This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

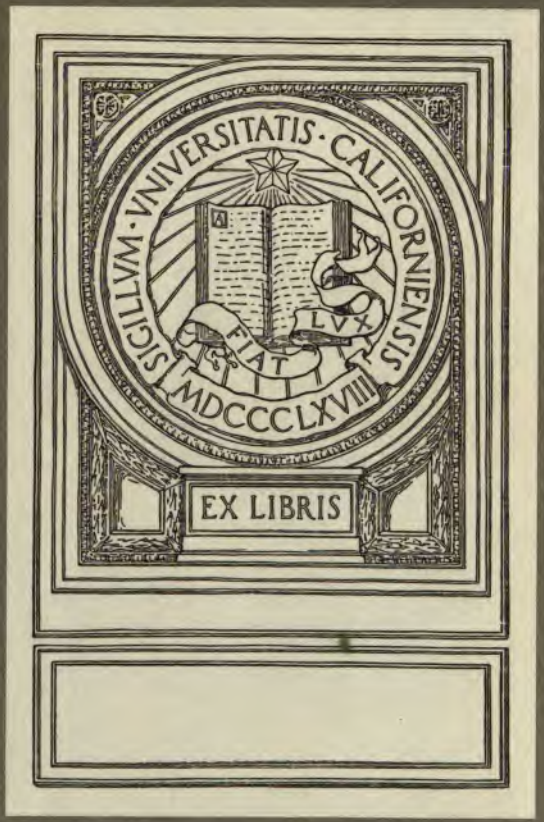
+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

UC-NRLF
$B 187 199


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
LVX
FIAT
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS

Das Wissen der Gegenwart

Deutsche Universal-Bibliothek für Gebildete.

XII Band:

Licht und Wärme

von

E. Gerland.

Leipzig: G. Freytag. 1883. Prag: F. Tempsky.

OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

Galileo Galilei.

Licht und Wärme

von

E. Gerland.

Mit 4 Porträts und 126 Figuren in Holzſtich.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

Leipzig: G. Freytag. 1883. Prag: F. Tempsky.

QC21
G4

Alle Rechte vorbehalten.
48230

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung	1
Das Licht.	
Lichtquellen und Schatten	3
Reflexion und Brechung an ebenen Flächen	11
Reflexion und Brechung an krummen Flächen	31
Das Auge und das Sehen	53
Fernrohr und Mikroskop	71
Das Licht als Wellenbewegung	84
Das Licht als transversale Wellenbewegung	104
Farbenerscheinungen bei der Brechung des Lichtes	114
Der Regenbogen	124
Farbenerscheinungen im Auge	129
Absorptionsfarben fester und flüssiger Körper	134
Absorptionsfarben der Gase und Dämpfe. Spectralanalyse	142
Anwendung der Spectralanalyse zur Untersuchung der Gestirne	158
Erklärung der Farben nach der Undulationstheorie. Interferenzfarben	164
Fluorescenz, Phosphorescenz und chem. Wirkung des Lichtes	181
Die Wärme.	
Ausdehnung der Körper durch die Wärme und Thermometrie	188
Strahlende Wärme	211
Wärmeleitung und spezifische Wärme, Schmelz- und Verdampfungswärme	227
Irdische Quellen der Wärme	243
Das Wesen der Wärme	248
Das Prinzip der Erhaltung der Kraft	264
Veränderung des Aggregatzustandes	271
Die Sonnenwärme und ihre irdischen Wirkungen	297

Quellennachweis der Abbildungen.

Figur 1, 2, 4, 5, 11, 12, 13, 19, 22, 25, 26, 27, 33, 35, 46, 47, 50, 53, 54, 57, 58, 59, 61, 64, 65, 69, 74, 75, 88 nach Guillemin La Lumière.

Figur 45 nach dem Bericht über die wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner Ausstellung im Jahre 1876, herausgegeb. v. A. W. Hofmann.

Figur 48 nach Stevenson, Lihgthouse Illumination.

Figur 52, 73 nach Helmholtz, physiologische Optik.

Figur 90, 92, 93, 95, 96 nach Roscoe, die Spektralanalyse.

Figur 101, 105, 109, 112, 113, 114, 115, 116, nach Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik.

Figur 117, 118, 125, 126 nach Tyndall, die Wärme als eine Art der Bewegung.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

Einleitung.

Wir sind gewohnt, Licht und Wärme, wenn nicht für die einzigen, so doch für die bei weitem wichtigsten Bedingungen der Existenz der organischen Wesen zu halten. Beide haben deshalb zu allen Zeiten und bei allen Völkern das hervorragendste Interesse erregt und in Dichtung und Mythologie stets eine bedeutende Rolle gespielt. Zwar sind es verschiedene Sinne, die uns Licht und Wärme zur Empfindung bringen. Jenes läßt uns der bei dem Menschen streng lokalisierte, aber an Schärfe alle anderen Sinne übertreffende Gesichtssinn wahrnehmen, diese der Wärmesinn, welcher bei großer Stumpfheit über die ganze Haut verbreitet ist, trotzdem aber kommen meistenteils beide gleichzeitig zu unserer Empfindung. Das Licht der Sonne, das Licht einer Lampe ist stets von Wärmewirkungen, begleitet und wenn schwächere Lichtquellen, wie der Mond, faulendes Holz, ein Leuchtkäfer nicht imstande sind, in uns auch Wärmeempfindung hervorzurufen, so hat dies nur in der zu geringen Feinheit unserer Sinne seinen Grund. Man möchte deshalb von vorne herein versucht sein, Licht und Wärme für ein und dasselbe zu halten und den Unterschied beider nur in unserer Empfindungsweise zu suchen

ſo daß dasſelbe Agens im Auge die Empfindung des Lichtes, auf der Haut die der Wärme hervorriefe. Dem ſteht jedoch entgegen, daß Wärme auch ohne Licht auftreten kann, wie die Wärme des menſchlichen Körpers oder die eines Ofens, in welchem das Feuer eben erloſchen iſt. Die Entſcheidung der Frage nach der Identität von Licht und Wärme ſtößt alſo auf größere Schwierigkeiten, als es von vorn herein den Anſchein hat, und wir werden, wenn wir ihre Beantwortung verſuchen wollen, zunächſt die das Weſen beider bedingenden Erſcheinungen genauer betrachten müſſen. Wir beginnen mit der Betrachtung des Lichtes.

Das Licht.

Lichtquellen und Schatten.

Alles Licht, welches zu uns gelangt, geht von Körpern aus; ohne sie würde dasjenige, was wir als das Unkörperlichste anzusehen gewohnt sind, nicht existieren können. Trifft es auf seinem Wege unser Auge, so übt es auf dasselbe einen Reiz aus und infolge davon sehen wir den Körper, von dem es stammt, in der Richtung, in welcher es zu uns kommt. Aber die Körper senden das Licht nicht nur aus, sie können es auch in seiner Bahn hemmen oder doch von derselben ablenken. Dafür macht es sie dann sichtbar. Wir müssen die Körper somit in leuchtende und nicht leuchtende einteilen und bemerken leicht, daß zu der letzteren Gruppe bei weitem die größte Zahl der Körper gehört, während es nur wenig leuchtende Körper giebt. Wenn die leuchtenden Körper ganz unabhängig von ihrer Umgebung und sonstigen Umständen stets sichtbar sind, da sie das Licht nach allen Seiten aussenden, so können die nicht leuchtenden nur dadurch sichtbar werden, daß Licht auf sie fällt. Dann aber müssen sie, wie jene, das Licht, wenn auch nicht nach allen, so doch nach vielen Seiten verbreiten, und somit, da das auf sie fallende Licht nur in einer Richtung auffällt, verursachen, daß es in andere Wege gezwungen wird. Infolge davon gewahrt von dem leuchtenden Körper das hinter dem nicht leuchtenden befindliche Auge nichts mehr, es

befindet sich im Schatten des letzteren. Doch verhalten sich nicht alle Körper so; es giebt auch eine große Anzahl, welche das Licht durch sich hindurch lassen, dabei aber meistens seine Richtung ändern. Durch den nicht leuchtenden Körper hindurch erblickt dann das Auge den leuchtenden, wenn auch oft an einer anderen Stelle oder auch anders gefärbt, als es ihn ohne Dazwischenkunft des nicht leuchtenden gesehen haben würde.

Fig. 1.

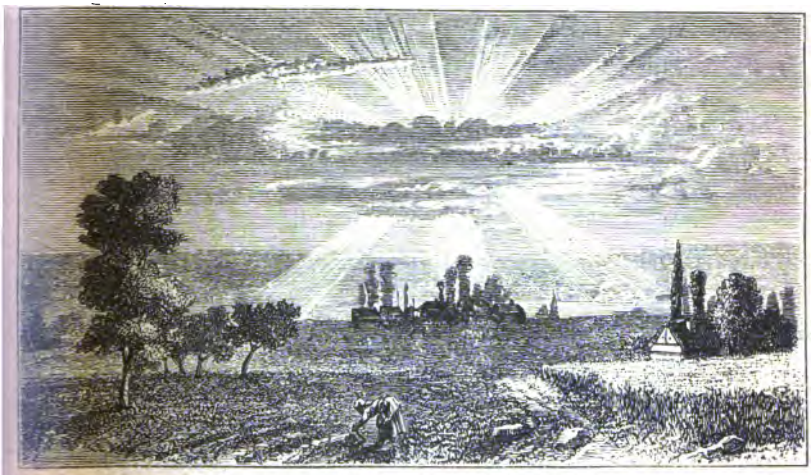
werden somit genötigt, auch zwischen undurchsichtigen oder opaken und durchsichtigen Körpern zu unterscheiden.

Der Schatten eines Körpers ist hiernach der von der Lichtquelle abgewandte Raum hinter ihm, in welchen kein Licht mehr dringt. Man macht ihn leicht sichtbar, wenn man einen undurchsichtigen Körper in das Sonnenlicht hält und Tabaksdampf hinter ihn bläst oder Staub daselbst aufwirbelt. Alsdann sieht man deutlich inmitten des hell erleuchteten den beschatteten

Raum, der auf dem Fußboden oder auf den Körpern, von denen er das Sonnenlicht abhält, eine dunklere Stelle hervorruft.

Es ist aber auch, wie Fig. 1, zeigt möglich, die Sache umzukehren, indem man durch eine kleine Öffnung im Fensterladen Licht in ein verdunkeltes Zimmer fallen läßt. Den Schatten, in welchem das Zimmer liegt, durchzieht dann ein helles Lichtband, welches man durch Verengerung der Öffnung beliebig schmal machen kann. In beiden Fällen zeigt sich, daß die

Fig. 2.



Grenzen des Schattens gerade Linien sind, und dasselbe beobachtet man überall, wo solche Grenzen sichtbar werden, wie, wenn die Sonnenstrahlen durch Öffnungen in einer Wolkenschicht in darunter befindliche dunstige Luft fallen, wenn, wie man zu sagen pflegt, die Sonne Wasser zieht, wovon Fig. 2 ein Bild giebt, oder wenn Wolken in solche Luft Schatten werfen, und bei anderen Gelegenheiten.

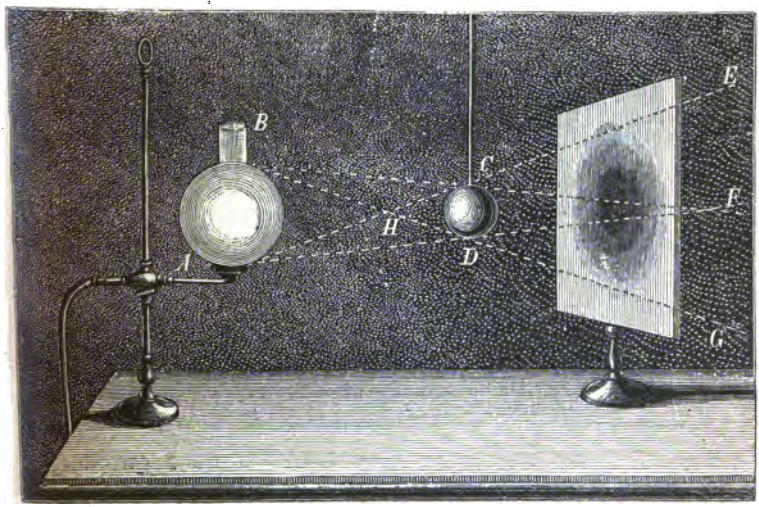
Eine solche Schattengrenze ist nun aber nichts anderes, als die Bahn des Lichts, welches gerade an dem schattenwerfenden

Körper vorbeigeht, und so zwingen uns tausende von Erfahrungen zu der Annahme, daß diese Bahn eine gerade Linie ist, oder mit andern Worten, daß sich das Licht in geraden Linien fortpflanzt. Diese Erfahrungen hat man längst in dem Symbole niedergelegt, womit man die Sonne in rohen Linien darzustellen gewohnt ist, ein Kreis, von dessen Peripherie nach allen Seiten gerade Linien ausgehen, und es bedeuten dabei diese Linien die Lichtstrahlen, wie wir das sich in geraden Linien von seiner Quelle aus fortbewegende Licht nennen.

Für gewöhnlich wird nicht der ganze beschattete Raum hinter einem beleuchteten Körper sichtbar, sondern nur die bereits erwähnte dunkle Stelle, welche ihn auf dem Erdboden ꝛc. begleitet. Diese und nicht den beschatteten Raum pflegt man in der Sprache des gemeinen Lebens den Schatten oder Schlagschatten des Körpers zu nennen, sonst hätte Chamisso das Märchen vom Peter Schlemihl nicht darauf gründen können, daß ein anderer dem Helden der Erzählung seinen Schatten abkauft, aufrollt und in die Tasche steckt. Die Form dieses Schattens ist bei Darstellung von Gegenständen, welche von der Sonne oder anderen Lichtquellen beleuchtet werden, von großer Wichtigkeit. Ihre Konstruktion muß deshalb von Malern und Zeichnern sorgfältig studiert werden; doch würden Künstler, welche sich lediglich an das Ergebnis dieser Studien halten wollten, grelle und unwahre Bilder liefern. Man geht nämlich beim Entwerfen des Schattens stets von der Voraussetzung aus, daß die Lichtquelle ein Punkt ist, von dem aus man die Strahlen zu ziehen hat, um dann als ihren Durchschnitt mit den das Licht auffangenden Flächen den Schatten zu bestimmen. Außer dem elektrischen Bogenlichte sind aber alle Lichtquellen, die merkliche Schatten entwerfen, ausgedehnt und erscheinen stets als leuchtende Flächen. Für solche ausgedehntere Lichtquellen gestalten sich dann die Verhältnisse wesentlich anders, wovon man sich durch folgendes Beispiel leicht überzeugen kann. Bringt man in die Nähe einer mit einer Milchglaskugel AB, Fig. 3, versehenen hellbrennenden

Lampe, welche nach allen Seiten gleich helles Licht ausstrahlt, eine undurchsichtige Kugel CD, so entwirft der Lichtpunkt A einen kegelförmigen (zuckerhutförmigen) Schatten AEF, dessen Spitze A ist und welcher sich die Kugel umfassend in den Raum erstreckt. Ebenso entwirft der Lichtpunkt B den Schatten BFG und ähnliche Schattenkegel entwerfen alle Punkte der Milchglaskugel, welche auf der CD zugewandten Seite liegen. In den Raum CFD, einen Kegel, dessen

Fig. 3.



Spitze von AB abgewandt liegt, fällt dann gar kein Licht von AB, man nennt ihn den Kernschatten. Er ist ein Teil eines ebenfalls kegelförmigen Raumes, welcher aber seine Spitze zwischen der Lampe und der Kugel in A hat und in den, soweit er nicht Kernschatten ist, Licht von wenigstens einigen Punkten der Lichtquelle fällt, und zwar von um so mehr, je näher er an der Grenzfläche liegt, welche durch CE und DG dargestellt ist. Nach derselben hin wird also das in ihm herrschende Licht vom Kernschatten aus bis zur vollen Beleuchtung stetig zunehmen, und

da es in ihm keine Stelle giebt, wo vollständiger Schatten herrscht, heißt dieser Raum Halbschatten. Stellt man demnach einen Papierschirm in den Schattenkegel, so wird auf demselben eine kreisförmige beschattete Stelle auftreten. Soweit der Kernschatten reicht, ist dieselbe vollkommen dunkel, durch den Halbschatten aber geht sie ganz unmerklich in die voll beleuchtete Fläche über.

Der Halbschatten wird um so schmaler, je weiter entfernt die Kugel von der Lichtquelle aufgestellt wird. Das Licht irdischer Lichtquellen ist nun allerdings zu schwach, als daß es auf größere Entfernungen einen noch erkennbaren Schatten werfen könnte. Hierzu ist aber das weitaus hellere Sonnenlicht und auch das Mondlicht sehr wohl befähigt. Der Schatten, den sie entwerfen, ist, da Sonne und Mond auch von der Erde aus als Scheiben von beträchtlichem Durchmesser erscheinen, stets von einem schmalen Halbschatten umsäumt, der angebracht werden muß, wenn eine Darstellung eines Schattens nicht hart und unwahr werden soll.

Im Gebirge ereignet es sich wohl, daß der Schatten, den Sonne und Mond, wenn sie dem Horizonte nahe stehen, von dem, vom Berggipfel herabschauenden Wanderer entwerfen, auf eine ihm nahe Wolken- oder Nebelwand fällt, und so sichtbar wird. Da der Beobachter aber durchaus nicht gewohnt ist, Schatten in der Luft zu erblicken, so versetzt er sie auf den nächsten Berggipfel hinter oder unter der Wolke, auf welchem dieselbe zu ruhen scheint. Dann aber sieht er die Schatten in einer solchen Größe, daß sie hier wie Riesen hohe Bäume überragen würden. Dadurch erklärt sich die Erzählung, die sich bei Plinius*) findet, von Geistern, die in den afrikanischen Gebirgen hausend, sich darin gefallen, die Bewegung der Menschen nachzuäffen, die Erscheinung des Brockengespenstes und a. m.

*) C. Secundus Pl., der Ältere, geb. 23 n. Chr. in Cornum, war Präfekt in Deutschland, dann Prokurator in Spanien, zuletzt Befehlshaber der Flotte zu Misenum. Er starb 79 beim Ausbruch des Vesuvs.

Verfolgen wir nun das oben erwähnte, in ein dunkles Zimmer fallende Lichtband weiter, so sehen wir es da, wo es auf die Wand oder den Fußboden trifft, einen hellen Flecken hervorrufen. Dabei fällt es nun sofort auf, daß dieser Flecken,

Fig. 4.

die Öffnung mag eine Form haben, welche sie will, stets die Gestalt der Lichtquelle abbildet, also rund ist, wenn wir mit Sonnenlicht operieren. Die Erscheinung tritt in noch merkwürdigerer Weise auf, wenn wir, wie Fig. 4 zeigt, zwischen eine

Lichtflamme und einen weißen Schirm, den sie beleuchtet, ein Stück Pappe halten, in welches ein nicht zu großes Loch gebohrt ist. Anstatt daß auf dem Schirme das Licht, welches das Loch durchdringt, einen hellen Flecken hervorruft, wie man erwarten sollte,

Fig. 5.

erscheint ein genaues Abbild der Lichtflamme daselbst, nur umgekehrt, die Spitze nach unten. Die Erklärung dieses Versuches hat nicht die mindeste Schwierigkeit. Licht, welches von den einzelnen Punkten der Flamme ausgeht, kann auf den hinteren

Schirm nur gelangen, indem es die Öffnung in der vorgehaltenen Pappe durchsetzt. Ein Lichtstrahl also, welcher dem unteren Endpunkte der Flamme entstammt, muß da, wo die durch die Öffnung und diesen Punkt gezogene Linie den Schirm trifft, also oben, auf demselben einen Punkt in der Farbe erleuchten, die er selbst hat. Ebenso wird ein oben in der Flamme liegender Punkt unten auf dem Schirm, ein links liegender der Flamme auf der rechten Seite u. s. w. einen ihm gleichgefärbten hellen Punkt hervorrufen. Es entsteht demnach eine Anzahl heller Stellen, die, was Form und Farbe betrifft, in derselben Reihenfolge wie die hellen Punkte der Flamme liegen; in der Gesamtheit derselben muß sich somit die Flamme auf dem Schirm abbilden, aber ihre oberen Teile unten, ihre unteren oben u. s. w. Wird die Öffnung größer, so erhält man anstatt der nahezu punktförmigen hellen Flecken größere, die die Form der Öffnung abbilden, und diese gehen in eine ausgedehntere beleuchtete Stelle von der Gestalt der Öffnung über, die von Halbschatten umsäumt ist, wenn die Öffnung die Lichtquelle an Größe weit übertrifft. Rückt man die Flamme vom Schirm zurück, so wird ihr Abbild auf dem Schirme kleiner und schärfer, da der Halbschatten zugleich schmaler wird, entfernt man aber den Schirm von der Pappe, so wird das Flammenbild größer und verwaschener. Dieser hübsche Versuch liefert auch sofort die Erklärung der zierlichen Lichter, Fig. 5, die man bei Sonnenschein immer auf dem Waldesboden bemerkt und die trotz der sicherlich höchst verschiedenen Form der Öffnungen, durch welche sie fallen, stets rund sind. Es sind eben Abbildungen der Sonne. Ist das aber der Fall, so müssen sie bei partiellen Sonnenfinsternissen sichelförmig werden, ein fremdartiger Anblick, mit dem eine solche Himmelserscheinung in der That den Beobachter überrascht.

Reflexion und Brechung an ebenen Flächen.

Wir wir sahen, werden nicht leuchtende Körper dadurch sichtbar, daß sie Licht, welches auf sie fällt, zerstreut zurück-

werfen, es diffus reflektieren. Dabei wird die Richtung der auffallenden Lichtstrahlen so verändert, daß das reflektierte Licht eine große Menge der verschiedensten Richtungen einschlägt, alle diejenigen nämlich, in welchen der diffus reflektierende Körper sichtbar wird. Betrachtet man nun einen solchen Körper genauer, so fällt sofort auf, daß seine Oberfläche stets mehr oder weniger rauh ist, Körper mit glatter Oberfläche zeigen gegen das Licht ein ganz anderes Verhalten. Um dasselbe verständlich zu machen, knüpfen wir zunächst an einige Erfahrungen an, die jedermann oft genug gemacht hat.

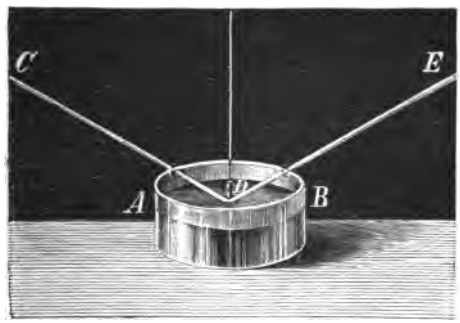
Wie oft blendet uns, wenn wir am Ufer eines Teiches oder Flusses hingehen, das vom Wasser zurückgestrahlte Sonnenlicht in der unerträglichsten Weise, während die Blendung aufhört, wenn wir einige Schritte zurücktreten. Diese wenigen Schritte verhindern weder, daß das Sonnenlicht nach wie vor auf das Wasser trifft, noch daß es von demselben zurückgeworfen wird. Doch kommt das zurückgeworfene Licht nicht mehr in das Auge des Beobachters. Es scheint somit, daß im Gegensatz zu der diffusen Reflexion das auf solche Art reflektierte Licht in einer ganz bestimmten Richtung zurückgeht, wenn es in einer ebenfalls bestimmten Richtung auffiel.

Dafür spricht auch der Umstand, daß wenn man in der Richtung des blendenden Lichtes auf das Wasser sieht, nicht etwa dieses erscheint, sondern die Sonne selbst, gerade so, als wenn wir direkt in sie sähen. Diese Täuschung kann nicht anders entstehen, als dadurch, daß Sonnenstrahlen, welche auf das Wasser fallen, alle in ganz geänderter Richtung zurückgehen und so von unten her in unser Auge gelangen.

Daß diese Erklärung richtig ist, läßt sich leicht experimentell beweisen, wenn man nur aus der großen Menge Sonnenstrahlen, welche auf eine glatte Fläche auffallen, einige wenige aussondert und den Lauf derselben verfolgt. Dazu stelle man ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß AB, Fig. 6, in ein dunkles Zimmer und lasse dann durch eine enge Öffnung im Fensterladen einen

Sonnenstrahl CD, (genau genommen ist dies freilich ein schmales Bündel solcher Strahlen) auf das Quecksilber fallen. Bläst man nun etwas Tabaksdampf über das Gefäß, so sieht man, wie ein Strahl DE von der Quecksilberoberfläche zurückgeht, und überzeugt sich leicht, daß der einfallende Strahl CD und der zurückgeworfene oder reflektierte Strahl DE mit der Oberfläche des Quecksilbers gleiche Winkel bilden. Hängt man alsdann an einem dünnen Faden ein eisernes Gewichtchen so auf, daß es gerade über D zu hängen kommt, so stellt dasselbe eine zur Quecksilberoberfläche in D gezogene Senkrechte,

Fig. 6.



das sogenannte Einfallslot dar. Man kann dann das Auge stets so stellen, daß die beiden Strahlen mit dem Einfallslote zusammenfallen. Ein Stück Papier, welches man so hält, daß es durch CD und DE geht, würde also auch durch den Faden gehen, und da beide Strahlen, wenn sie mit der Quecksilberoberfläche gleiche Winkel bilden, dies auch mit dem Einfallslot thun, so müssen wir das bereits den alten Griechen bekannte Reflexionsgesetz folgern, daß Einfallslot, einfallender und reflektierender Strahl in einer Ebene liegen und daß der Einfalls- und Reflexionswinkel, das sind die Winkel, welche beide Strahlen mit dem Einfallslote einschließen, gleich sind.

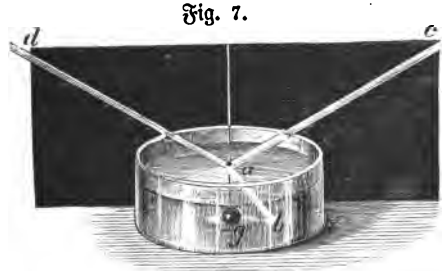
Unsere oben ausgesprochene Vermutung, daß eine glatte

Oberfläche nur in einer Richtung auf sie fallendes Licht reflektiert, bestätigt sich somit und wir unterscheiden diese Art der Reflexion als regelmäßige von der diffusen.

Der Versuch wird übrigens auch genügend sichtbar, wenn man statt ihn im dunklen Zimmer anzustellen, das Strahlenbündel auf das in den Sonnenschein gestellte Quecksilber fallen läßt, indem man einen großen Bogen Pappe, in welchen ein Loch gebohrt ist, zwischen der Sonne und dem Gefäße aufstellt.

Wendet man statt des Quecksilbers das durchsichtige Wasser an, so zeigt sich die kompliciertere Erscheinung, welche Fig. 7 wiedergiebt. Im Punkte a teilt sich der einfallende Strahl da in

Fig. 7.



zwei neue, den reflektierten ac und den gebrochenen ab, welcher in veränderter Richtung in das Wasser eindringt. Der Brechungswinkel, wie man den Winkel, den ab mit dem Einfallslote macht, nennt, wächst mit dem Einfallswinkel, wovon man sich leicht überzeugen kann. Den Zusammenhang beider Winkel aber giebt das Brechungsgesetz. Dieses erhält man freilich nicht so einfach wie das Reflexionsgesetz und es ist deshalb viel später als jenes, erst im 17. Jahrhundert durch den gelehrten Snellius*) entdeckt. Danach findet sich z. B. für Wasser die Richtung des gebrochenen Strahles, wenn man Fig. 8 aus dem Punkte a

*) Wilebrord Sn. van Royen, geb. 1591 zu Leiden, wurde 1613 Professor der Mathematik in seiner Vaterstadt und starb daselbst, viel zu früh für die Wissenschaft, 1626.

als Mittelpunkt den Kreisbogen cb beschreibt, die auf ab Senkrechten cd zieht, diese in vier gleiche Teile teilt, durch den c zunächst gelegenen Teilpunkt e die gerade Linie ef parallel zu ab zeichnet, endlich fa zieht und über a hinaus verlängert. Die Verlängerung von fa, welche stets in der durch Einfallslot und einfallenden Strahl bestimmten Ebene liegt, giebt dann die Richtung des gebrochenen Strahles, wenn sich das Licht aus Luft in Wasser bewegt. Ist das Umgekehrte der Fall, also in Fig. 8 oben Wasser und unten Luft, während fa den einfallenden Strahl vorstellt, so zieht man zunächst den Bogen fb, teilt die Senkrechte von f auf ba in drei gleiche Teile, trägt einen derselben über f hinaus

Fig. 8.

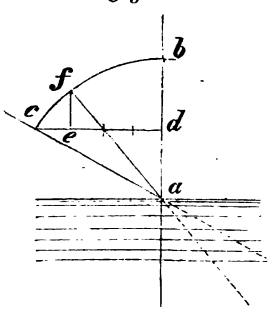
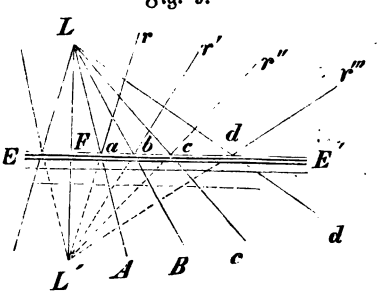


Fig. 9.



an, bestimmt c mit Hilfe einer durch den so gefundenen Punkt gezogenen zu ab parallelen Linie und zieht ca. Die punktirt gezeichnete Verlängerung von ca ist dann der gebrochene Strahl.

Hätte man anstatt Luft und Wasser zwei andere Körper, die ein Lichtstrahl durchsetzte, genommen, so würde die Konstruktion des gebrochenen Strahles dieselbe sein, nur daß man den Linien cd und ed ein anderes Verhältnis geben müßte, wie 4 : 3.

Für die nämlichen Stoffe behält dies sogenannte Brechungsverhältnis aber seinen Wert, der Einfallswinkel mag so groß oder klein sein, wie er will. Ist der zweite Körper optisch

dichter, als der erste, so ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel, der Strahl wird zum Einfallslote hin gebrochen; findet das Umgekehrte statt, so übertrifft der Einfallswinkel den Brechungswinkel, der Strahl wird vom Einfallslote weg gebrochen. Nur in dem einen Fall, daß der einfallende Strahl senkrecht auf die brechende Fläche trifft, dringt er ohne Richtungsveränderung in den zweiten Körper ein, und wird auch in derselben Richtung reflektiert.

Die Wichtigkeit der Eigenschaft glatter Flächen, dem sie Anschauenden nicht selbst zu erscheinen, sondern ihm statt dessen gegenüber liegende Gegenstände zu zeigen, ist jedem entgegengetreten, der jemals in der Lage war, sich eines Toilettenspiegels zu bedienen. Es wird nun unsere Aufgabe sein, zu zeigen, daß diese Eigenschaft lediglich eine Folgerung aus dem Reflexionsgesetze ist. Dieselbe ist ohne Mühe zu lösen, indem wir zunächst betrachten, was geschieht, wenn von einem leuchtenden Punkt L, Fig. 9, nach verschiedenen Richtungen ausgehende Strahlen La, Lb, Lc, ꝛc. auf eine glatte Fläche, deren Durchschnitt EE′, darstellt, auffallen. Wäre die glatte Fläche nicht vorhanden, so gingen die Strahlen geradlinig von L nach A, B, C, D ꝛc. Die Fläche bewirkt, daß sie bei a, b, c, d ꝛc. so von ihrer Richtung nach ar, br′, cr″, dr‴ ꝛc. abgelenkt werden, daß sie mit dem Einfallslot und also auch mit der Fläche gleiche Winkel bilden. Denselben Winkel, welchen aA, bB, cC, dD ꝛc. mit der Fläche bilden würden, müssen dann nach der Reflexion auf der andern Seite ar, br′, cr″, dr‴ mit ihm einschließen. Man wird also diese neuen Richtungen erhalten, wenn man den unteren Teil der Fig. so um EE′ dreht, daß die Linien aA, bB ꝛc. auf die obere Seite von EE′ zu liegen kommen, also so, wie es geschieht, wenn das die Zeichnung tragende Papier, um es zusammenzufalten, längs EE′ gebrochen würde. Es liegt auf der Hand, daß alsdann die neuen Lagen dieser Teile der Strahlen in einem Punkte L′ zusammentreffen müssen, der auf der entgegengesetzten Seite von EE′ liegt wie L, und zwar eben so weit

davon entfernt, wie L auch. In das Auge eines Beobachters, der sich vor dem Spiegel aufgestellt hat, gelangen also Strahlen in solchen Richtungen, als kämen sie von dem Punkte L', und da er seinen von früher Jugend gemachten Erfahrungen zufolge in dem Vereinigspunkt dieser Strahlen einen leuchtenden Punkt sehen muß, so glaubt er ebensoweit hinter der glatten Fläche EE' einen zweiten leuchtenden Punkt zu sehen, als der wirkliche vor derselben liegt. Wenn wir uns nun leicht überzeugen, daß dies nicht der Fall ist, so bleibt die Täuschung doch bestehen und wir nennen einen solchen Punkt, der hinter der glatten Fläche, dem Spiegel erscheint, das Spiegelbild des Punktes. Die Konstruktion dieses Spiegelbildes gelingt dann ohne Schwierigkeit, wenn wir von L die senkrechte LF auf den Spiegel EE' ziehen und sie um ihre eigene Länge verlängern.

Was nun von einem leuchtenden Punkte gilt, gilt von allen anderen; von den Punkten A, B, C, D Fig. 10, wird somit der Spiegel SS die Bilder a, b, c, d entwerfen, die in derselben Reihenfolge über-, unter- oder nebeneinander liegen, wie die Punkte am Gegenstande. Im ebenen Spiegel muß also ein dem Gegenstande gleiches Bild erscheinen. Stehen wir hinter dem Gegenstande, so erscheint seine uns zugekehrte Seite im Spiegel von uns abgekehrt. Betrachten wir uns selbst im Spiegel, so wird unsere linke Seite zur rechten u. s. w. Dies Bild kann man nicht auf einem Schirme auffangen, weil sich die Strahlen, die die Täuschung hervorrufen, als ob sich hinter dem Spiegel leuchtende Punkte befänden, nicht wirklich, sondern nur in der Verlängerung schneiden. Solche Bilder nennt man virtuelle im Gegensatze zu den reellen, welche entstehen, wenn sich die Strahlen wirklich, also vor dem Spiegel schneiden.

Die besten ebenen Spiegel sind die Oberflächen von undurchsichtigen Flüssigkeiten, also namentlich die des Quecksilbers, weil sie alles auf sie fallende Licht reflektieren und so vollkommen glatt und eben sind, wie wir die Oberfläche eines Körpers überhaupt erhalten können. Doch haben sie die große Unbe-

quemlichkeit, daß sie nur in horizontaler Lage zu verwenden sind. Von dieser Unbequemlichkeit frei sind äußerst fein polierte Metallflächen, die ebenso, wie die Oberfläche des Quecksilbers, alles sie treffende Licht zurückwerfen. Solche werden aber an der Luft zu leicht blind. Die fortschreitende Technik

Fig. 10.

hat es indessen verstanden, Spiegel herzustellen, welche die Vorteile der Metallspiegel besitzen, ohne ihre Nachteile zu zeigen. Sie stellt unsere jetzt gebräuchlichen Spiegel so her, daß sie möglichst ebene und überall gleich dicke Glasplatten sogenannte Spiegelglasplatten durch aufgepreßtes halbflüssi-

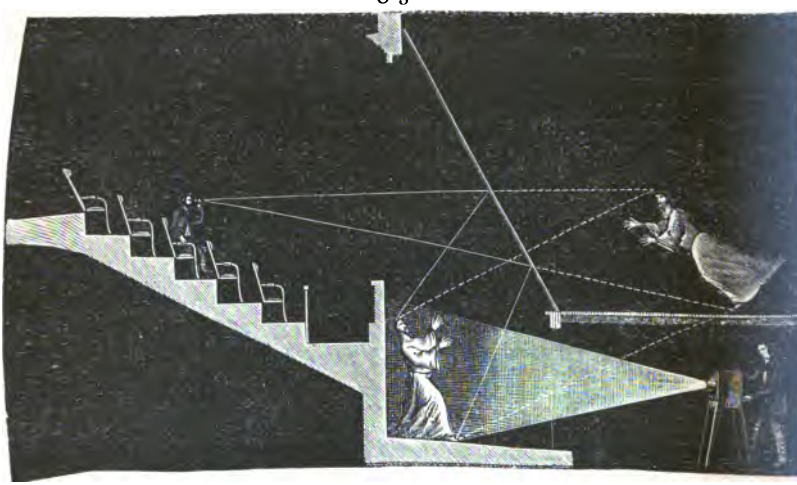
ges Zinnamalgam auf der einen Seite mit einem ebenen Metallspiegel bedeckt, welcher dann fest am Glas haftet. Noch schöner werden Spiegel, wenn man die eine Seite der Glasplatte mit einer dünnen Silberschicht auf chemischem Wege überzieht, doch ist die Herstellung solcher Silberspiegel schwieriger. Alle diese Spiegel zeigen dann freilich zwei Bilder, ein lichtschwaches, welches durch Reflexion an der vorliegenden Glasfläche, und ein sehr lichtstarkes, welches durch Reflexion an der die Hinterwand bildenden Metallfläche entsteht. Sieht man, wie es gewöhnlich geschieht, in senkrechter Richtung in den Spiegel, so fallen diese beiden Bilder zusammen und beeinträchtigen einander nicht; doch erscheint das eine, störende Ränder des anderen bildend, wenn man in schiefer Richtung im Spiegel das Bild eines hellen Gegenstandes, einer Lichtflamme z. B., betrachtet. Ja es können, wie wir später sehen werden, sogar noch mehr Bilder auftreten. Um diese mehrfachen Bilder zu vermeiden, hat Foucault*) Spiegel dadurch hergestellt, daß er auf die Spiegelglasplatte eine dünne Schicht Platin niederschlug, welches Metall völlig luftbeständig ist. Wegen der äußerst geringen Dicke der Metallschicht haben diese Spiegel zugleich den Vorteil, durchsichtig zu sein.

Die Fabrikation der Spiegel ist gegenwärtig ein höchst wichtiger Industriezweig geworden. Daraus ist aber durchaus kein Schluß auf die Zunahme der Eitelkeit zu ziehen. Denn wenn auch nicht geleugnet werden kann, daß dieselbe durch den Gebrauch der Spiegel befördert wird, so ist doch der Grund, aus welchem man ein Zimmer mit Spiegeln zu versehen pflegt, ein dekorativer. Indem sie es erhellen, lassen sie es größer erscheinen. Dazu freilich ist es nötig sie zwischen zwei Fenster oder so anzubringen, daß das in das Zimmer eintretende Licht erst in die Spiegel gelangt, nachdem es von den sie umgebenden Gegen-

*) Léon F., geb. 1819 in Paris, war anfangs Literat, dann Physiker an der Sternwarte in Paris, wo er 1868 starb.

ständen zerstreut reflektiert worden ist. Namentlich hat man es in der Kunst der Herstellung erstaunlich großer Spiegelglasplatten weit gebracht, die wiederum erlaubt haben, bedeutend größere Schaufenster für Läden herzustellen, als man vor noch nicht langer Zeit konnte. Solcher Platten hat man sich dann bedient, um gewisse, höchst überraschende Bühneneffekte zu erhalten. Da sie, wenn sie nicht belegt sind, sowohl Licht reflektieren, als auch hinter ihnen befindliche Gegenstände recht wohl

Fig. 11.

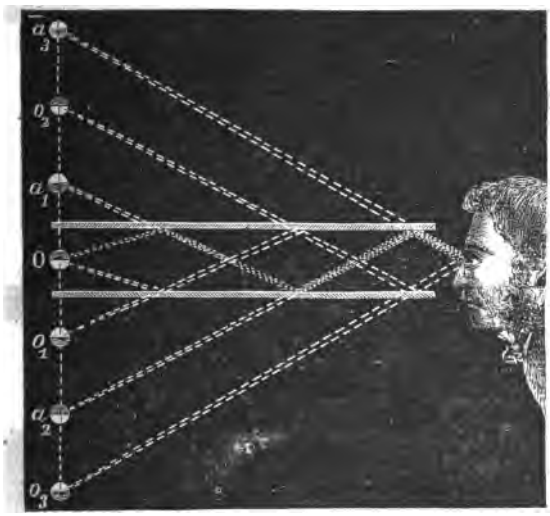


sehen lassen, so benutzt man sie in der Weise zur Darstellung von Geistererscheinungen, daß man eine solche Platte, Fig. 11, in schiefer Lage vor der Bühne aufstellt, während ein in weiße Gewänder gehüllter Mensch vor dem Zuschauerraum, aber für die Zuschauer unsichtbar, postiert ist. So lange derselbe nicht sehr hell beleuchtet ist, ist sein Spiegelbild viel zu schwach, als daß man es neben oder vor den Gegenständen auf der Bühne wahrnehmen könnte. Wirft man aber die Strahlen einer sehr hellen Lampe von dem Raum unter der Bühne aus auf

ihn, so geben die von der Platte reflektierten Strahlen ein sehr wohl zu bemerkendes Spiegelbild und ein Zuschauer erblickt dann eine durchsichtige menschliche Gestalt auf der Bühne. Ebenso wendet man ebene Spiegel stets in solchen Fällen an, wo man Gegenstände sehen will, ohne sich ihnen zuzuwenden, als Spionspiegel vor den Fenstern ꝛc.

Wichtiger sind die Anwendungen der ebenen Spiegel für wissenschaftliche Zwecke. Da man dazu mit sehr kleinen

Fig. 12.



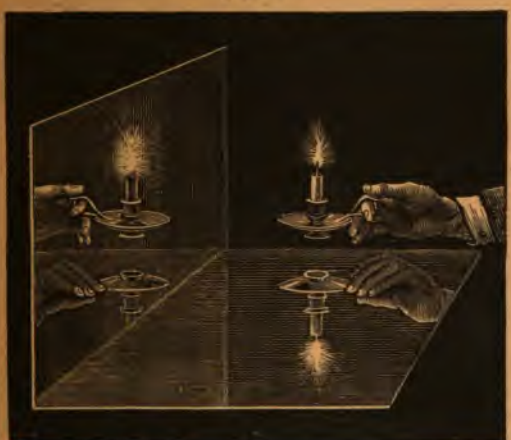
Spiegeln ausreicht, so sind dieselben längst im Gebrauch. Wir erwähnen zunächst den Heliostat und den Heliotrop; beide haben den Zweck, die Richtung von Sonnenstrahlen, die auf sie fallen, zu verändern. Der erstere dient dazu, dieselben behufs der verschiedensten Untersuchungen, von denen einige bereits erwähnt wurden, durch eine Öffnung im Fensterladen eines verdunkelten Zimmers zu leiten und muß, damit sie stets den Weg einhalten, mit der Hand oder durch ein Uhrwerk der Sonne nachgedreht

werden. Den letzteren dagegen benutzt man, um bei Ausmessungen von Teilen der Erdoberfläche Signale auf weite Entfernungen hin zu geben, indem man ihn so stellt, daß er von einer Beobachtungsstation aus nach einer entfernten zweiten Sonnenlicht reflektiert. Auch die Ärzte bedienen sich neuerdings kleiner ebener Spiegel, um den Kehlkopf eines Patienten beobachten zu können. Sie bedürfen dazu zwei, einen, der in schiefer Lage über den Kehlkopf gehalten wird, den andern, um damit auf den ersten Spiegel und von ihm auf den Kehlkopf Licht zu werfen. Der erste ist ein gewöhnlicher ebener Metallspiegel. Von der besonderen Einrichtung des letzteren wird später die Rede sein.

Fallen Strahlen, welche von einem Spiegel zurückgeworfen sind, auf einen zweiten Spiegel, so werden sie hier nochmals reflektiert, und da dies so geschieht, als kämen sie von dem Bilde im ersten Spiegel, so muß von dem zweiten ein Bild entworfen werden, gerade so, als wenn das vom ersten entworfene Bild ein Gegenstand wäre. Sind z. B., wie Fig. 12 zeigt, die Spiegel parallel, so entwerfen sie von einem leuchtenden Gegenstand O, welcher sich zwischen beiden befindet, eine Anzahl Bilder, von denen die mit o bezeichneten den vom unteren Spiegel in das Auge gelangenden Strahlen, die a genannten dem vom oberen Spiegel reflektierten Licht ihre Entstehung verdanken. Die Figur läßt ferner ersehen, daß diese Bilder abwechselnd den Gegenstand in umgekehrter und aufrechter Stellung wiedergeben und daß ihre Zahl zunimmt, je näher die Spiegel an einander liegen oder je länger sie sind. Stehen ferner die Spiegel, wie in Fig. 13, senkrecht aufeinander, so entwerfen sie von einem Gegenstande 3 Bilder, von denen eines aufrecht und zwei umgekehrt sind; bilden sie endlich einen Winkel von 60° miteinander und stellen wir beide senkrecht auf, so erscheint ein kleiner Körper a, den man dazwischenlegt, versechsfacht. Legt man dann in der Weise, wie Fig. 14 zeigt, zwei Stäbchen ab und ac neben a, so vereinigen sich dieselben mit ihren fünf Bildern zu einem sechseckigen Stern. Solche Spiegel, die man nun unter einem be-

liebigen Winkel gegen einander stellen kann, heißen **Winkelspiegel**. Abgesehen von ihrer Anwendung bei einigen nautischen und geodätischen Instrumenten, benutzt man sie im **Kaleidoskop** zur Herstellung der verschiedenartigsten Muster. Fig. 15 stellt das-

Fig. 13.



selbe so dar, als ob durch Herausschneiden eines Längsstreifens aus dem Blech- oder Papprohre, welches den Hauptbestandteil

Fig. 14.

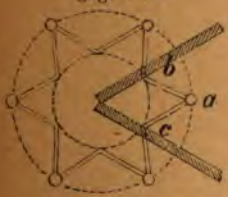


Fig. 15.

des Instrumentes ausmacht, das Innere desselben sichtbar gemacht worden wäre. An dem einen Ende sieht man zwei Platten, die äußere von Milchglas, die andere von Spiegelglas, welche so in das Rohr eingesetzt sind, daß zwischen ihnen eine schmale

Kammer bleibt, die bis etwa über die Mitte mit farbigen Glasstückchen, Moosstengeln ꝛc. oder auch wie bei den neuen von Amerika aus in den Handel gebrachten Apparaten, mit Glasröhrchen gefüllt sind, die farbige Flüssigkeiten enthalten. Das andere Ende dagegen ist mit einem undurchsichtigen Deckel geschlossen, in dessen Mitte sich eine kreisrunde Öffnung zum Hereinsehen befindet. Innerhalb des Rohres sind vor demselben zwei unter 60° geneigte Spiegel befestigt. Das Auge, welches in die kleine Öffnung sieht, erblickt sehr schön gefärbte Sterne, die in mannigfaltigster Weise wechseln, wenn man durch Drehen oder Schütteln des Apparates andere in der Kammer befindliche Körperchen in den Raum oberhalb der Spiegel bringt.

Bei den bisher betrachteten Spiegeln fand die Spiegelung stets dann statt, wenn ein Lichtstrahl aus der Luft an eine Wasser-, Metall-, oder Glasoberfläche gelangte. Es kann aber auch die ebene Trennungsfläche zweier scharf gegen einander abgegrenzter Luftschichten als Spiegel wirken. Dem Namen nach ist die dann auftretende Erscheinung bekannt genug. Wer hätte nie von Luftspiegelung oder Kimmung, von der Fata morgana der Wüste gehört oder gelesen? Aber gesehen haben sie nur wenige, obgleich sie auch bei uns nicht so gar selten ist; denn in der Form, in der sie am häufigsten vorkommt, ist sie ziemlich unscheinbar, tritt freilich auch häufiger nur in ebenen Gegenden und hier nur dann auf, wenn bei vollkommener Windstille die Sonne größere Bodenflächen, welche mit demselben Material bedeckt sind, also Sandwüsten, mit Stoppeln oder mit Schnee bedeckte Felder, gleichmäßig erwärmt und so die Entstehung über einander gelagerter verschieden warmer Luftschichten begünstigt. Dieselben werfen dann das Licht zurück wie Wasserflächen, und so kommt es, daß die Luftspiegelung dem in der Wüste Verirrten Wasser vorlügt, das verschwindet, wenn er sich nähert, daß dem Wanderer, der an sonnigen, trockenen Tagen durch die norddeutsche Tiefebene zieht, die Feldfurchen mit Wasser gefüllt erscheinen, daß in seltenen Fällen der Seefahrer Küsten oder

Schiffe in umgekehrter Stellung in der Luft erblickt, während die Einförmigkeit der ihn umgebenden Wasserwüste nichts unterbricht.

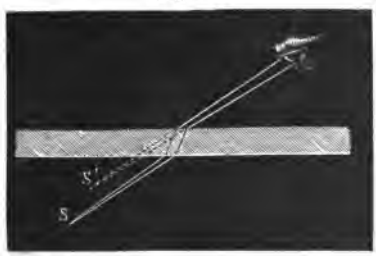
Haben wir nun bisher den reflektierten Strahl verfolgt, und gesehen, wie er die Täuschung hervorzurufen vermag, ein Gegenstand befinde sich in einer bestimmten Richtung vor uns, wo er sich doch gar nicht befinden kann, so haben wir nun ebenso mit dem gebrochenen Strahl zu verfahren. Wollten wir zur Lösung dieser Aufgabe auch Sonnenlicht benutzen, so müßten wir uns unter Wasser begeben und hier unsere Beobachtungen anstellen. Davon kann nun nicht die Rede sein. Aber wir können ja auch, wie gelegentlich der Ableitung des Brechungsgesetzes gesagt wurde, die Sache umkehren, Lichtstrahlen in unser Auge fallen lassen, welche aus Wasser in Luft gegangen sind. Dazu können wir aber Licht benutzen, welches von irgend einem durch das Tageslicht beleuchteten Körper ausgestrahlt wird, also z. B. das Licht, welches vom Körper eines Fisches ausgeht. Wer jemals versucht hat, Fische zu schießen, der weiß, daß sie sich nie da befinden, wo man sie sieht, sondern immer tiefer. Ebenso erscheint der Boden eines Wasserbehälters immer höher, als er wirklich liegt. Folgender Versuch ist geeignet, uns über diese eigentümlichen Thatsachen vollständig aufzuklären. Legt man, Fig. 16, eine kleine Münze a auf den Boden eines leeren Wasserglases und stellt das Auge o so, daß die Münze gerade noch vom Rand des Gefäßes verdeckt erscheint, der Strahl ao also gerade an diesem Rande vorbeigeht, und gießt dann vorsichtig Wasser in das Glas, so erscheint die Münze nunmehr in der Richtung ab in c, mithin gegen ihre frühere Lage gehoben. Bei b muß also der Strahl ab von dem Einfallslote weg gebrochen werden, in die Richtung bo. In dieser glauben wir die Münze

Fig. 16.

zu sehen. Aus demselben Grunde erscheint ein in Wasser getauchter Stab an der Stelle, an der er in das Wasser eintaucht, gebrochen, und zwar der im Wasser befindliche Teil nach oben. Die Strahlen, die von den einzelnen Punkten desselben ausgehen, nehmen alsdann einen ähnlichen Weg wie abo, die sie entsendenden Punkte müssen also höher erscheinen, als sie sich wirklich befinden.

Daß sich andere Körper gerade so verhalten wie Wasser, kann man an den Glaswürfeln sehen, welche als Briefbeschwerer vielfach verwendet werden. Legt man einen solchen auf Notenpapier und bringt das Auge über ihn in eine Stellung, bei welcher die mitten unter dem Würfel durchgehenden Linien gerade erscheinen, so ist dies mit den auf beiden Seiten befindlichen nicht mehr der Fall. Im Würfel scheinen sie weiter nach Außen zu liegen, als außerhalb desselben, und zwar um so mehr, je weiter sie von der Mitte entfernt sind. Die schief austretenden Strahlen sind also von ihrer Richtung abgelenkt. Dasselbe geschieht, wenn Strahlen, welche von einem Punkte S ausgehen, eine von zwei parallelen Ebenen begrenzte Glasplatte durchsetzen, wie dies Fig. 17 darstellt. Dieselben werden durch die Platte gebrochen und das nach S blickende Auge sieht statt S den gegen ihn etwas verschobenen Punkt S'. Gewöhnliche Fensterscheiben sind übrigens selten von parallelen Ebenen begrenzt und bewirken deshalb meist erhebliche Verzerrungen der durch sie erblickten Gegenstände. Die zu Schaufenstern verwendeten Glasplatten sind aber von dieser Unvollkommenheit frei, man erblickt deshalb die Gegenstände durch sie eben so, als wäre zwischen ihnen und dem Auge nur Luft. Gewöhnlich sind diese Platten sehr dick und zeigen dann die überraschende Erscheinung,

Fig. 17.



daß schmale und helle Gegenstände, durch sie gesehen, doppelt oder auch mehrfach erscheinen. Fig. 18 dient dazu, diese merkwürdige Thatsache zu erklären. Ist A ein Gegenstand, so wird ein nach a fallender Strahl hier gebrochen und reflektiert, der gebrochene ab ebenso in b der reflektierte abermals in c, der hier reflektierte abermals in d u. s. w. An der A abgewandten Seite der Platte tritt also eine Anzahl Strahlen aus, von denen jeder Anlaß zu einem Bilde von A giebt und ebenso an der A zugewandten Seite. Ein ganz schief vor einem Spiegel aufgestelltes Licht kann demnach ebenso eine Anzahl neben einander liegender Bilder liefern, wie Fig. 19 zeigt von denen das zweite, an der Amalgamschicht reflektierte, das hellste ist, wovon oben bereits die Rede war.

Fig. 18.

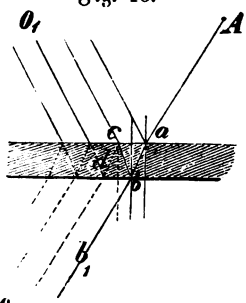
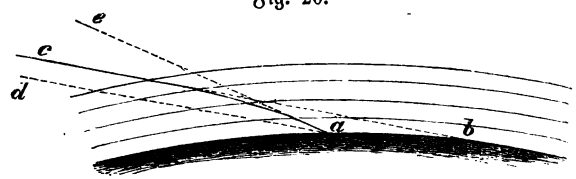


Fig. 19.

Wenn wir gelegentlich der Luftspiegelung gesehen haben, daß Luftschichten übereinander bestehen können, an deren Grenzfläche Reflexion eintritt, so muß an denselben auch Brechung stattfinden, und wenn das der Fall ist, so müssen die Himmelskörper, deren Licht diese Luftschichten durchdringt, höher am Himmel zu stehen scheinen, als sie wirklich stehen. Man begreift, daß die Kenntnis einer solchen Änderung im Orte der Gestirne für den Astronomen von höchster Wichtigkeit sein muß, und so ist denn auch diese unter dem Namen der astronomischen

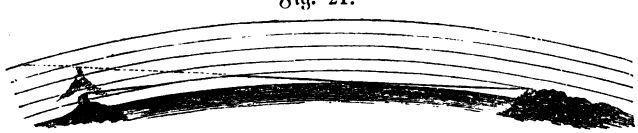
Strahlenbrechung bekannte Erscheinung genau untersucht worden. Das Resultat dieser Untersuchung war, daß man in der That die Atmosphäre als aus Schichten bestehend ansehen muß, welche das Licht verschieden brechen. Fig. 20 zeigt den Gang, welchen somit ein Lichtstrahl c durch die Atmosphäre nimmt. Während er ungebrochen bei b ankommen würde, gelangt er nun nach a. Ein dort befindlicher Beobachter sieht ihn demnach in e. Dies muß bei astronomischen Messungen stets in Rechnung ge-

Fig. 20.



zogen werden. Die Ablenkung der Strahlen in der Luft kann aber auch zu einer der Luftspiegelung sehr ähnlichen Beobachtung Veranlassung geben, daß nämlich an Küsten Schiffe oder durch einen Meeresarm getrennte Nachbarküsten, welche infolge der

Fig. 21.



Krümmung der Erde unsichtbar sein müßten, doch wenigstens zeitweise gesehen werden können, so die französische Küste von der englischen aus, die nordafrikanische von Sizilien ꝛc. Den Gang, den alsdann die Strahlen nehmen müssen, bringt Fig. 21 zur Anschauung.

Nun wird aber dem aufmerksamen Leser längst eine Frage auf den Lippen schweben, welche ihm die Betrachtung der Fig. 8 nahe gelegt haben muß. Wenn ein Lichtstrahl an der Grenzfläche zweier Körper so gebrochen wird, daß der Brechungswinkel

größer ist, als der Einfallswinkel, so wird der erstere eher zu einem rechten Winkel heranwachsen, als der letztere. Ist dies aber

Fig. 22.

geschehen, so muß der gebrochene Strahl längs der brechenden Fläche verlaufen. Was wird nun aber die Folge sein, wenn der Ein-

fallswinkel noch größer wird? Theorie und Experiment beantworten in gleicher Weise diese Frage dahin, daß dann gar keine Brechung, sondern nur Reflexion, sogenannte totale Reflexion, stattfindet. Um die Erscheinung zu beobachten, muß man Licht aus Wasser z. B. in Luft fallen lassen; das ist leicht zu bewerkstelligen, wenn man so, wie es Fig. 22 zeigt, von unten gegen die Oberfläche eines mit Wasser gefüllten Glases sieht; darin befindliche Gegenstände zeigen dann ein sehr helles und klares Spiegelbild an der Oberfläche wie in der Figur der Stiel des Löffels. Ebenso deutlich zeigt sich die totale Reflexion, wenn man, Fig. 23, ein mit Luft gefülltes Glasrohr in ein flaches Gefäß mit Wasser hält und Tageslicht in schiefer Richtung auf die Oberfläche des Wassers fallen läßt. Die Bahn, die alsdann einer der Strahlen desselben einschlägt, zeigt die Figur. Man sieht, daß er zunächst beim Eintritt in das Wasser gebrochen, dann an der im Glasrohr enthaltenen Luft reflektiert, endlich beim Austritt aus dem Wasser nochmals gebrochen wird. Sieht man nun in der Richtung des so austretenden Strahles auf das Rohr, so erscheint es, soweit es im Wasser liegt, mit einem Körper gefüllt, der alles auf ihn fallende Licht zurückwirft, also mit einem Metalle. Dieses Metall scheint Quecksilber zu sein, denn da

Fig. 23.

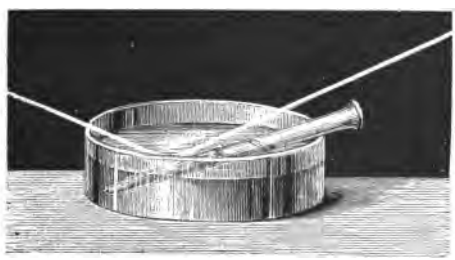
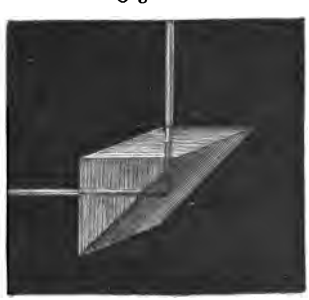


Fig. 24.



die Oberfläche des hellglänzenden Teiles eine Fortsetzung der Wasseroberfläche sein muß, so scheint der total reflektierende Körper auch flüssig zu sein. Nun gieße man etwas Wasser in das Röhrchen! Dann hört, so weit das Wasser reicht, die totale Reflexion auf und man glaubt die merkwürdige Erscheinung von Queckſilber, welches auf Wasser schwimmt, zu erblicken. Es versteht sich von selbst, daß man anstatt des Wassers auch Glas verwenden kann, um totale Reflexion zu erhalten. Dazu hat man nur Licht auf das in Fig. 24 gezeichnete Glasprisma, dessen Querschnitt ein gleichschenkliges rechtwinkliges Dreieck ist, fallen zu lassen, so daß dasselbe die eine Seitenfläche in senkrechter Richtung trifft.

Die in der Figur schief gestellte Fläche bildet dann einen höchst vollkommenen Spiegel und das Licht tritt ganz ungeschwächt, aber mit seiner früheren Richtung einen rechten Winkel bildend, aus der horizontal gestellten Fläche aus. Solche Prismen wendet man mit großem Vorteil an, wenn man hoch am Himmel stehende Gestirne, die Sonne ꝛc. beobachten will. Während man ohne ein solches Prisma sich in unbequemster Lage unter das Fernrohr kaueren müßte, um hindurch zu blicken, gestattet die Anwendung desselben, in sehr bequemer Stellung von Oben her herein zu sehen.

Reflexion und Brechung an krummen Flächen.

In früheren Jahrhunderten, wo diejenigen, welche sich der Naturwissenschaft befleißigten, teils aus eigener Liebhaberei, teils um der besseren Meinung ihrer Mitmenschen willen sich mit Apparaten und Naturprodukten umgaben, die wunderbar aussahen und Wunder zu wirken schienen, durften Spiegel in dem Hausrate nicht fehlen, mit dem sie ihre Zelle vollstopften. Ließen sich doch, wenn man den Spiegel einigermaßen zu verbergen wußte, damit Wirkungen erzielen, welche dem an solche Dinge nicht gewöhnten Laien vollkommen unbegreiflich erscheinen mußten. Die im vorigen Jahrhundert sich ausbreitende Ver-

wendung der Glasspiegel machte diesen unnützen Spielereien ein Ende. Nur eine hat sich erhalten, aber auch sie ist aus der düsteren Zelle in die dem Vergnügen geweihten Gärten gegangen, in denen man kleinere und größere spiegelnde Glaskugeln aufstellt, dem guten Geschmack zum Hohne und den Augen der Besucher solcher Gärten zu unausstehlicher Blendung. Tritt man vor diese Kugel, so erblickt man immer ein verkleinertes, allerdings sehr niedliches Bild des Gartens, sich selbst aber auf das häßlichste verzerrt, mit ungeheurem Kopfe auf kleinem Körper und in dem Gesichte die Nase unförmlich vergrößert. Man ersieht daraus, daß nicht nur ebene Spiegel Bilder von ihnen gegenüber befindlichen Gegenständen entwerfen können, sondern daß hierzu auch polierte gekrümmte Flächen geeignet sind. Jeder polierte Lampenfuß, Löffel, Knopf beweist dasselbe, aber alle diese Flächen liefern im Gegensatze zum ebenen Spiegel verzerrte Bilder.

Die wichtigsten dieser Spiegel sind die Kugelspiegel, deren Form man sich am leichtesten vergegenwärtigen kann, wenn man von einem Apfel ein Stück so abschneidet, daß man das Messer nicht durch seine Mitte führt und sich dann die Schale abgesondert vom Fleische denkt. Die gewölbten Uhrgläser, wie man sie früher im Gebrauch hatte, würden also solche Spiegel vorstellen und zwar erhabene oder konvexe, wenn man auf die erhabene, hohle oder konkave, wenn man auf die hohle Fläche derselben sieht. In größerem Maßstabe und von besserer Wirkungsfähigkeit verfertigt man sie von Metall oder auch von Glas. Indessen kann ein jedes solches Uhrglas dazu dienen, um die Versuche, von denen ausgehend wir die Wirkungsweise solcher Spiegel darstellen wollen, zu machen, wenn man nur die äußere oder innere Seite mit Tusche ausmalt.

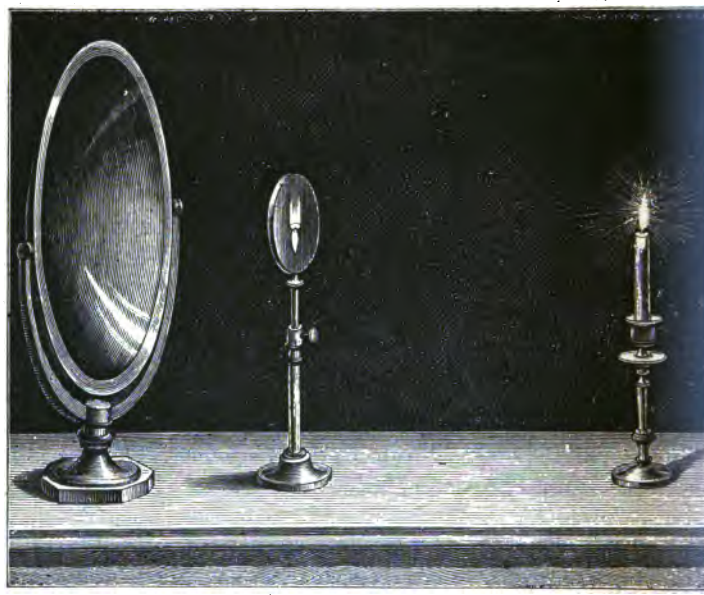
Wir halten zunächst einen solchen Spiegel in die Sonnenstrahlen, so daß dieselben senkrecht auf seine Mitte, also parallel seiner Achse auffallen, wie man die Linie nennt, welche den Mittelpunkt des Spiegels mit dem der Kugel, von welcher er ein

Stück ist, verbindet. Sowohl im erhabenen, wie im Hohlspiegel erscheint alsdann ein nahezu punktförmiges Sonnenbildchen, im ersteren hinter, im letzteren vor dem Spiegel. Das vom Hohlspiegel entworfene Sonnenbild kann man also nur sehen, wenn man einen Schirm, ein Stückchen Papier z. B. so lange davor hin und her bewegt, bis man einen blendend hellen kleinen Kreis darauf erhält. Man hüte sich jedoch bei größeren Hohlspiegeln diesen Punkt mit dem Finger aufzusuchen. Dies von größeren Hohlspiegeln entworfene Sonnenbild ist nämlich nicht nur sehr hell, sondern auch sehr heiß; der Punkt, in dem es entworfen wird, heißt nicht umsonst Brennpunkt, denn die in ihm vorhandene Hitze entzündet mit Leichtigkeit ein Stück Papier. Woher diese Helligkeit und Hitze kommt, bemerkt man sofort, wenn man vor den Spiegel, auf den die Sonnenstrahlen treffen, Tabaksdampf bläst. Man sieht alsdann die auf ihn fallenden Strahlen in einem leuchtenden Kegel zurückgehen, dessen Spitze eben in dem Brennpunkte liegt, in welchem somit alle auf den Spiegel fallenden Strahlen vereinigt werden. Da nun wegen ihrer großen Entfernung die von einem Punkte der Sonne ausgehenden Strahlen als parallel anzusehen sind, so ist der Brennpunkt des Spiegels kein anderer als der Vereinigungspunkt solcher Strahlen, welche seiner Achse parallel auf den Spiegel fallen. Wäre die Sonne ein Punkt, so würden auch die vom Hohlspiegel zurückgeworfenen Strahlen sich in einem solchen schneiden, das Sonnenbild auch ein Punkt sein. Da die Sonne aber von der Erde aus gesehen als Scheibe erscheint, so erhält man auch eine solche, allerdings von sehr geringer Ausdehnung, im Brennpunkte. Dies Scheibchen ist somit ein Bild der Sonne.

Um zu sehen, was für Bilder die Kugelspiegel von näheren Gegenständen entwerfen, hat man nur ein Licht in verschiedenen Entfernungen vor dem Spiegel aufzustellen. Daß der erhabene Spiegel stets aufrechte und verkleinerte Bilder entwirft, haben wir bereits gesehen, größere Mannigfaltigkeit zeigt der Hohl-

spiegel. Stellt man, wie Fig. 25 zeigt, ein brennendes Licht in ziemlicher Entfernung vor demselben auf, zwischen Licht und Spiegel aber einen kleinen transparenten Schirm, so erhält man ein verkleinertes umgekehrtes Bild des Lichtes auf diesem Schirm Nähert man das Licht dem Spiegel, so rückt das Bild von ihm weg und wird immer größer. Haben beide die gegenseitige Lage,

Fig. 25.



die Fig. 26 giebt, so befindet sich jetzt das Bild in großer Entfernung vom Spiegel und ist größer als der Gegenstand. Erreicht das Licht den Brennpunkt, so erscheint der Spiegel blendend hell, ohne daß man ein Bild der Flamme wahrnehmen könnte, und rückt man dasselbe dem Spiegel noch näher, so zieht sich diese Helligkeit zu einem vergrößerten aufrechten Bilde der Lichtflamme zusammen, welches nunmehr aber hinter dem Spiegel erscheint. Fig. 27 stellt den Sachverhalt für diesen Fall dar.

Ähnlich wie beim ebenen Spiegel muß die Bedingung dafür, daß der Kugelspiegel von ihm gegenüber aufgestellten Gegenständen ein Bild entwirft, die sein, daß er die von einem leuchtenden Punkt auf ihn fallenden Strahlen so reflektiert, als

Fig. 26.

kämen sie von einem Punkte hinter dem Spiegel, oder so, daß sie sich noch in einem Punkte vor dem Spiegel vereinigen. Kann man also diesen Punkt finden, so ist es leicht den Gang der auf einen Kugelspiegel fallenden Strahlen darzustellen, vorausgesetzt, daß man den Brennpunkt des Spiegels kennt. Wie man sich

durch die oben beschriebenen Versuche nun leicht überzeugt, liegt derselbe immer in der Mitte des Halbmessers derjenigen Kugel, von der der Spiegel ein Stück ist, beim erhabenen Spiegel hinter, beim Hohlspiegel vor der reflektierenden Fläche. Lichtstrahlen also, die parallel der Achse des Spiegels auffallen, müssen in einer Linie reflektiert werden, welche den Einfallspunkt mit dem

Fig. 27.

Brennpunkte verbindet. In Fig. 28 bis 31 stellt nun LL_1 einen Gegenstand dar, welcher sich vor einem Kugelspiegel befindet, C den Mittelpunkt, H den Brennpunkt des Spiegels. Die parallel der Achse CH auffallenden Strahlen LB und L_1D werden dann in der Richtung BH und DH reflektiert. In BH oder ihrer Verlängerung muß also der Bildpunkt von L liegen, und um ihn zu bestimmen, braucht man nur die Richtung eines zweiten Strahles, der von

L und L, ausgeht, nach der Reflexion zu bestimmen. Dazu bietet sich am bequemsten der durch den Mittelpunkt C gehende Strahl. Da dieser in senkrechter Richtung auf die spiegelnde Fläche auffällt, wird er ebenso reflektiert, also giebt der Durchschnitt der Linien LC und BH den Bildpunkt L' von L, derjenige der Linien L_1C und DH das Bild L'_1. So kann man für jeden Punkt des Gegenstandes den zugehörigen Bildpunkt suchen und

Fig. 28.

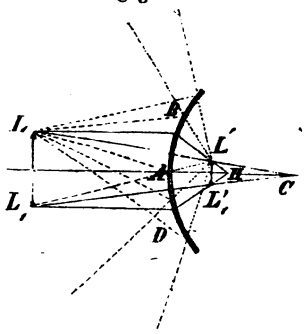


Fig. 29.

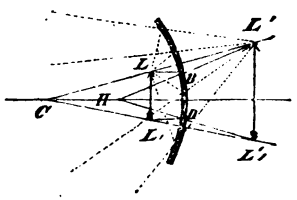


Fig. 30.

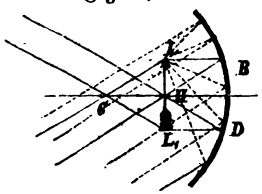
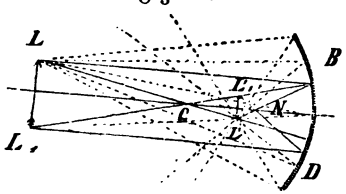


Fig. 31.

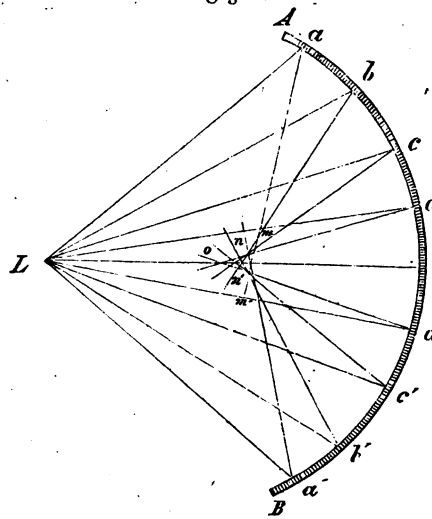


erhält dann von LL_1 das Bild $L' L'_1$. Die vorhin erwähnten vier Fälle sind in den Figuren konstruiert, die punktierten Linien geben den Gang beliebiger Strahlen, die von L auf den Spiegel fallen und reflektiert werden. In analoger Weise kann man dieselben dann auch für L_1 bestimmen. Der erhabene Spiegel liefert also nur virtuelle, der Hohlspiegel virtuelle oder reelle Bilder. Strahlen, welche von einem Gegenstand, der sich im Brennpunkt befindet, auf den Spiegel fallen, werden, wie Fig. 30 zeigt, parallel

reflektiert werden, also sich gar nicht schneiden, sie können mithin, wie wir es auch gesehen haben, nur dazu dienen, den Spiegel im Ganzen zu erleuchten.

Mit dem Ergebnis dieser Konstruktion steht nun aber im Widerspruch, was wir oben von den Bildern gesagt haben, die der erhabene Spiegel von nahe vor demselben aufgestellten Gegenständen entwirft, sie sind nicht nur verkleinert, sondern auch verzerrt. Ebenso zeigt ein Blick in einen Hohlspiegel, den man recht nahe vor das Gesicht hält, daß auch dann von diesem der Gegenstand entstellt wieder gegeben wird. Die Bilder der Kugelspiegel erhalten nämlich stets auch eine Krümmung im Sinne des Spiegels und zugleich erscheinen die dem Spiegel näher liegenden Teile eines Gegenstandes größer als die entfernteren. Ist nun der Gegenstand dem Spiegel nicht sehr nahe, so sind die Krümmungen und die verschiedenen Größenverhältnisse nicht zu bemerken und dann genügt es, um das Bild der Linie LL' zu finden, die Bilder der Punkte L und L' zu suchen und beide durch eine gerade Linie zu verbinden. Konstruiert man aber die Bilder der einzelnen Punkte eines Gegenstandes, welcher dem Spiegel sehr nahe liegt, so wird in der That das Bild der geraden Linie eine krumme.

Fig. 32.



Überhaupt gilt die ganze Konstruktion nur, wenn das Stück der Kugel, welche als Spiegel benutzt wird, klein ist im Ver-

hältnis zu ihrem Halbmesser. Ist das nicht der Fall, so schneiden sich Strahlen, welche in verschiedener Entfernung von dem Durchschnittspunkt der Achse mit dem Spiegel, dem Scheitel, auffallen, nach der Reflexion nicht in demselben Punkte, vielmehr liegt der Durchschnittspunkt der näher am Scheitel reflektierten Strahlen weiter von diesem entfernt, als der Durchschnittspunkt von Strahlen, die ihn in größerer Entfernung vom Scheitel treffen. Von benachbarten Punkten eines Hohlspiegels reflektierte Strahlen, die von ein' und demselben Lichtpunkte ausgehen, schneiden sich also in Punkten, die um so weiter von der Achse entfernt liegen, als die reflektierten Punkte des Spiegels. Ist somit, Fig. 32, AB der Spiegel, L der leuchtende Punkt, so werden die bei a und b reflektierten Strahlen sich in m schneiden, die von b und c reflektierten in n u. s. w., und da die Stellen, wo sich mehrere reflektierte Strahlen schneiden, heller erscheinen als solche, die nur von einem derselben getroffen werden, so entsteht vor dem Spiegel eine auf der Achse in eine Spitze auslaufende helle Linie mnon'm'. Einen Hohlspiegel stellt nun aber jedes halbkugelige Gefäß mit spiegelnden Wänden dar; füllt man ein solches mit einer trüben Flüssigkeit, etwa Milchkaffee, und setzt es in die Sonne, so werden diese Punkte sichtbar und man erblickt in der Flüssigkeit eine zarte Lichtlinie von der Form, welche Fig. 33 dargestellt ist und Brennlinie oder kaustische Linie genannt wird.

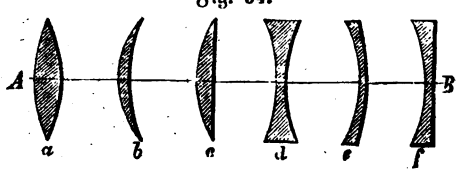
Fig. 33.

Spiegel, die nach Cylinder- oder Kegelflächen gekrümmt sind, geben immer verzerrte Bilder. Sie dienen selten zu etwas anderem, als zu Spielereien. Zu solchen werden indessen die Bilder der Kugelspiegel im allgemeinen auch nur verwandt. Wirklichen Gebrauch macht man allein von der Eigenschaft der Hohlspiegel, Strahlen einer in ihrem Brennpunkte aufgestellten Lichtquelle parallel zu machen. Diese kommt freilich in noch höheren Grade solchen Spiegeln zu, welche nach einer Parabel gekrümmt sind. Kugel- und paraboliſche Hohlspiegel finden deshalb häufige Verwendung als Reflektoren bei Blendlaternen, Lokomotiv- und Schiffslaternen ꝛc. Neuerdings sind sie auch in der Medizin wovon bereits beim Kehlkopfspiegel die Rede war, von größter Wichtigkeit geworden, um Hohlräume des Körpers, Auge, Ohr, Schlund ꝛc. hell zu beleuchten. Dazu wirft der Arzt mittelst des Spiegels das Licht einer Lampe oder Tageslicht in die zu beleuchtende Höhlung und sieht durch eine kleine im Scheitel des Spiegels angebrachte Öffnung hinein. In das Ohr steckt er außerdem noch einen kegelförmigen Hohlspiegel, der das Licht weiter auf dem Trommelfell konzentriert. Nach ihrer früheſten Verwendung heißen solche Beleuchtungsspiegel Augenspiegel. Ihnen verdanken wir die Fortschritte der Augenheilkunde in der Neuzeit, ja durch sie war es erst möglich, diesen Zweig der Medizin zu schaffen; sie haben den Physiologen sogar in den Stand gesetzt, im lebenden menschlichen Organismus einige seiner Lebenserscheinungen zu beobachten.

So wichtig nun auch diese Anwendungen der Reflexion an Kugelflächen sind, so werden sie hierin noch weit von denen der Brechung in solchen Flächen übertroffen. Kann man doch getrost behaupten, daß es unter den Kulturvölkern wohl kein einziges Individuum giebt, welches von derartigen Anwendungen nicht dauernd oder vorübergehend Gebrauch machte. Dies scheint auf den ersten Blick unmöglich, da wir doch eigentlich höchst selten oder nie in die Lage kommen, durch eine krumme Begrenzungsfläche zweier Stoffe, an welcher Brechung des Lichtes stattfindet,

zu sehen. Dieser Schein schwindet aber, wenn wir bedenken, wie häufig wir genötigt werden, durch einen lichtbrechenden Körper, welcher von zwei krummen Flächen begrenzt ist, hindurchzublicken. Jedes Brillenglas, jede Lupe, jedes Brennglas ist ja ein solcher und der ausgedehnte Gebrauch dieser Gläser dürfte unsere obige Behauptung hinreichend rechtfertigen. Man nennt solche Gläser wegen der Ähnlichkeit der Form einer Art derselben mit der bekannten Hülsenfrucht Glaslinsen und versteht darunter im allgemeinen Glasstücken, welche von zwei Kugelflächen begrenzt sind. In Fig. 34 sind die in der Anwendung vorkommenden Formen derselben so dargestellt, als wären sie in der Mitte durchschnitten, so daß die Linse selbst beschrieben würde durch Umdrehung der Schnitte um die gerade Linie AB als Drehungs-

Fig. 34.



achse. Diese Linie wird dann Achse der Linse genannt. Ein Blick auf die Figur zeigt, daß die Linsen in zwei Gruppen zerfallen, a, b, c sind in der Mitte dicker, d, e, f in der Mitte dünner als am Rande. Die ersteren heißen Sammellinsen, die letzteren Zerstreuungslinsen.

In ihrer Wirkungsweise zeigen die Linsen die bemerkenswerteste Ähnlichkeit mit den Kugelspiegeln. Eine vor das Auge gehaltene Zerstreuungslinse (Kurzsichtigenbrille) gewährt denselben Eindruck, als wenn man in einen erhabenen Kugelspiegel blickt. Sie liefert uns ein verkleinertes Bild aller Gegenstände, welche sich auf deren anderer Seite, wie das Auge, befinden. Da dieselben zugleich der Linse näher gerückt erscheinen, so müssen die in ihr gebrochenen Strahlen so weiter gehen, als kämen sie von Punkten, welche ihr näher liegen, wie die wirklichen Aus-

gangspunkte, sie müssen also nach der Brechung stärker divergierend werden. Die Sammellinse (Weitsichtigenbrille) giebt dagegen wie der Hohlspiegel Strahlen, die sich nach der Brechung schneiden, kann also ein auf einem Schirme auffangbares Bild eines Gegenstandes liefern. Davon überzeugt man sich leicht, wenn man, wie in Fig. 35 geschehen ist, zwischen ein Licht und einen Schirm eine Sammellinse hält; sie entwirft auf dem letzteren ein umgekehrtes reelles Bild des Lichtes, das je nach der

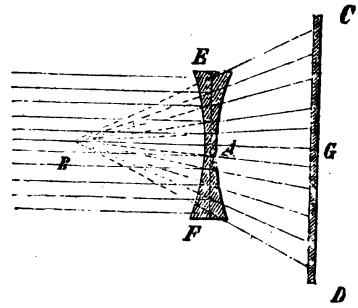
Fig. 35.

Stellung von Linse und Licht im Vergleich zum Schirm vergrößert oder verkleinert wird, oder ihm an Größe gleichkommt. Rückt der Gegenstand der Linse sehr nahe, so liefert sie kein reelles Bild mehr. Sieht man aber durch die Linse nach dem Gegenstande hin, so erscheint er vergrößert, die Linse entwirft also nunmehr ein virtuelles Bild und diese Eigenschaft ist es eben, welche uns eine solche Linse als Lupe zu benutzen gestattet.

Um über die Art, wie diese Bilder zustande kommen, klar zu werden, hat man die Linsen nur mit einer Seite so gegen die

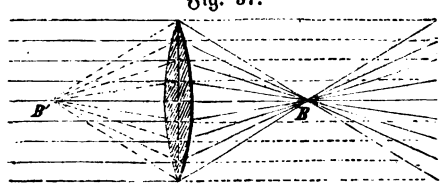
Sonne zu halten, daß die Sonnenstrahlen parallel der Achse auffallen, und Tabaksdampf auf die andere Seite zu blasen. Zerstreuungs- und Sammellinsen verhalten sich dann ganz verschieden. Die auf die ersteren auffallenden Strahlen gehen so weiter, als kämen sie von einem Punkte B, Fig. 36, auf der beleuchteten Seite der Linse, den man ersten Hauptbrennpunkt nennt und den man leicht durch Messung bestimmen kann, wenn man in geringe Entfernung von der nicht beleuchteten Seite der Linse einen Schirm CD hält. Auf ihm erscheint dann ein heller Kreis, der größer ist als der Durchmesser der Linse. Beide Durchmesser CD und EF hat man dann nur so an eine Linie BG senkrecht anzutragen, daß DC und EF von BG halbiert werden und der Abstand beider auf der Linie gleich dem Abstande AG der Linse von dem Schirm ist, um durch die Verlängerungen der Verbindungslinien den Brennpunkt B zu finden.

Fig. 36.



Bei der Sammellinse liegt der erste Hauptbrennpunkt auf der nichtbeleuchteten Seite (Fig. 37). Er ist direkt durch Messung zu bestimmen, indem man ihn mittelst eines Stückchens Papier aufsucht. In ihm ist übrigens die Wärme, wie im Brennpunkte des Hohlspiegels so groß, daß das Papier leicht entzündet werden kann. Durch ähnliche Versuche kann man sich überzeugen, daß einerseits alle Sammellinsen und andererseits alle Zerstreuungslinsen

Fig. 37.



sich ganz gleich verhalten, die Form mag sein, welche sie will. Dies ergiebt sich auch bereits aus dem Umstande, daß die Wirkung einer Linse sich nicht ändert, wenn man sie so herumdreht, daß die vorher nicht beleuchtete Seite nunmehr beleuchtet wird. Daraus folgt zugleich, daß eine jede Linse zwei Brennpunkte haben muß, die in gleichen Entfernungen von ihr auf ihren beiden Seiten liegen, und daß wir somit zwischen dem ersten Hauptbrennpunkte oder dem Vereinigungspunkte von Strahlen, welche der Achse parallel auffallen, und dem zweiten Hauptbrennpunkte oder dem Ausgangspunkte solcher Strahlen, welche nach der Brechung der Achse parallel werden, unterscheiden müssen.

Dieselbe Überlegung, welche wir bei den Kugelspiegeln anstellten, setzt uns nun auch bei den Linsen in den Stand, die Richtung der von ihnen gebrochenen Strahlen zu bestimmen. Da für jeden Punkt ein Bildpunkt vorhanden ist, so müssen in diesem die Lichtstrahlen sich nach der Brechung schneiden und man findet ihn, wenn man nur die Richtung zweier Strahlen nach der Brechung bestimmen kann. Das hat aber keine Schwierigkeit, denn ein der Achse parallel auffallender Strahl geht nach der Brechung entweder selbst oder in seiner Verlängerung durch den ersten Hauptbrennpunkt. Ein Strahl aber, welcher die Mitte der Linse trifft, geht, wie ein Blick auf Fig. 36 und 37 zeigt, ungebrochen hindurch, da er wegen der symmetrischen Form der Linse die Oberfläche derselben in zwei einander parallelen Stellen schneidet. Unter Berücksichtigung dessen, was wir oben gesagt haben, wird man ferner aus der Betrachtung der Figuren 38 bis 42 leicht entnehmen, wie die Bilder der Linsen construiert werden können wenn man beachtet, daß der Mittelpunkt der Linse immer mit C, der erste Hauptbrennpunkt mit B, der Gegenstand mit A E und das Bild mit A′ E′ bezeichnet ist. Fig. 38 giebt das von der Zerstreuungslinse entworfene verkleinerte, aber aufrechte, Fig. 39 und 40 das vergrößerte und verkleinerte umgekehrte Bild, das die Sammellinse hervorruft. Fig. 42 giebt das

vergrößerte aufrechte Bild einer Linse der letzteren Art und Fig. 41, bei der sich der Gegenstand im 2. Hauptbrennpunkt befindet, zeigt, daß alsdann gar kein Bild entstehen kann, sondern die ganze Linse in dem Lichte strahlt, welches von dem Gegenstande auf sie fällt. Liegt also der Brennpunkt näher der Linse, d. h. ist sie kugeliger, so entwirft sie auch von einem Gegenstande in geringerer Entfernung ein scharfes Bild, als wenn die Linse flacher, der Brennpunkt also entfernter ist. Auch hier deuten die punktierten Linien den Gang von beliebigen Strahlen an, welche auf die Linse fallen.

Fig. 38.

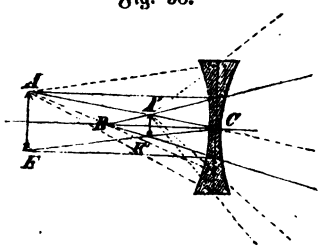


Fig. 39.

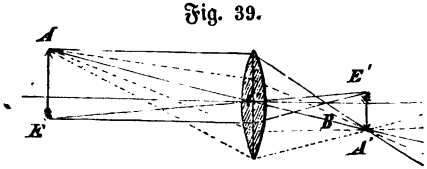
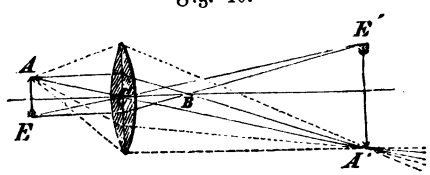


Fig. 40.



Stellt man übrigens die Versuche mit der größten Aufmerksamkeit an, so findet man, daß die Brennpunkte von Strahlen, welche in größerer Entfernung von der Achse auffallen, der Linse näher liegen als die, welche in der Nähe der Achse verlaufen, ganz in derselben Weise, wie wir dies bei den Spiegeln auch beobachtet haben. Wir dürften also genau genommen nicht von einem Brennpunkte der Linse, sondern müßten von einem Brennraume derselben reden. Es entstehen so bei stark gekrümmten Linsen Abweichungen von der gegebenen Konstruktion, welche

unter dem Namen der sphärischen Aberration bekannt sind. Man vermindert diese Abweichungen in demselben Maße, in welchem man die entfernter von der Achse auffallenden Strahlen abblendet, oder indem man zwei weniger stark gekrümmte Linsen anwendet, welche dieselbe Wirkung haben wie die eine stärker gekrümmte.

Die Anwendungen der Linsen sind viel mannigfaltiger als die der Spiegel. Nicht nur ihre Bilder, sondern auch ihre Eigenschaft, auf sie fallenden Strahlen eine bestimmte Richtung zu erteilen, werden benutzt. Ob sie die Alten bereits kannten, darüber ist viel hin und her gestritten worden. Aus einer Stelle des Aristophanes glaubte man schließen zu müssen, daß

Fig. 41.

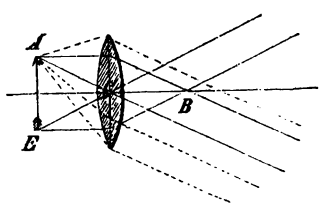
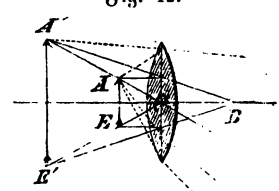


Fig. 42.

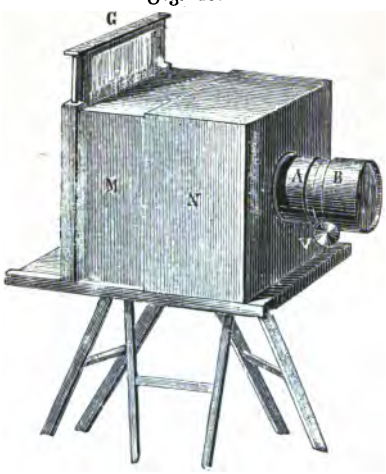


dies der Fall gewesen sei; dieselbe ergiebt mit Sicherheit, daß die Zeitgenossen des Sokrates und Platon Brenngläser hatten und mit ihnen zu operieren wußten. Aber diese Brenngläser können auch mit Wasser gefüllte Glaskugeln gewesen sein, wie sie namentlich früher von den Schuhmachern zur Verstärkung des Lichtes ihrer Lampen verwendet wurden. Erst die Auffindung einer Sammellinse aus Bergkrystall in den Ruinen von Ninive, welche unter Umständen gefunden wurde, die die Möglichkeit einer späteren Einschleppung ausschlossen, und jetzt im britischen Museum in London aufgestellt ist, bewies unwiderleglich, daß die Kunst Linsen zu schleifen bis in das graue Altertum zurückreicht. Auch die Eigenschaft der Sammellinsen, durch sie betrachtete Gegenstände größer erscheinen zu lassen, als sie sind, war der antiken

Welt bekannt, dennoch ist ihr der Gebrauch der Linsen als Vergrößerungsglas fremd geblieben.

Die Benutzung der Linsenbilder gehört der neueren Zeit an. Auf sie gründen sich zwei von Porta*) im 16. Jahrhundert erfundene Apparate, die **Camera obscura** und die **Laterna magica**. Die erstere, welche Fig. 43 zeigt, ist der bekannte Apparat, mit welchem der Photograph auf der lichtempfindlichen Platte scharfe Bilder der Gegenstände, welche er photographieren will, hervorruft. Sie besteht aus einem Kasten N mit beweglicher hinteren Hälfte M, in dessen Vorderwand ein Rohr AB mit einer solchen Kombination von zwei Sammellinsen eingesetzt ist, daß keine sphärische Aberration stattfindet. Mittelst Zahnstange und Trieb kann das die Linsen tragende Rohrstück B hin und her bewegt und so auf dem Hintergrund des Kastens stets ein scharfes Bild eines vor der Linse befindlichen Gegenstandes erhalten werden. Die hintere Wand G des Kastens besteht für gewöhnlich aus einer matten, transparenten Glastafel, auf die das Bild fällt. Nachdem sich der Photograph durch genaue Betrachtung desselben von der richtigen Einstellung der Linse überzeugt hat, nimmt er die Glastafel heraus und entwirft nun das Bild auf die präparierte Platte, auf die es sich dann überträgt. Wie das Photographieren das Zeichnen nach der Natur, so hat

Fig. 43.



*) Giambattista de la P., geb. 1538 in Neapel, lebte dort nach mannigfachen Reisen als Privatmann und starb daselbst 1615.

die Camera obscura des Photographen die des Zeichners verdrängt. Diese bestand ebenfalls aus einem Kasten, welcher oben eine Linse trug, über der ein unter 45° geneigter Planspiegel aufgestellt war, um das Licht der gegenüberliegenden Gegenstände auf die Linse zu werfen, welche ihrerseits ein reelles Bild derselben auf dem Blatte des Zeichners hervorrief.

Die Camera obscura läßt sich nun leicht in die Laterna magica verwandeln und zwar in die Form derselben, welche ihr Kircher*) gegeben hat und die Fig. 44 zeigt. Man hat nur in den Kasten eine helle, mit Reflektor versehene Lampe zu stellen, vor die in der Figur herausgenommene Kombination der Linsen A und B bei T ein mit transparenten Farben auf Glas gemaltes Bild zu schieben, um dasselbe umgekehrt und vergrößert auf einer Wand gegenüber dem Apparate zu erhalten. Der Kasten muß alsdann selbstverständlich mit einem Schornstein für die Lampe versehen werden.

Fig. 44.

Um die von dem Apparat entworfenen Bilder besser sehen zu können, stellt man ihn in einem dunkeln Zimmer auf und dies vertritt dann den Raum in dem Kasten der Camera obscura. Zwei solcher Apparate dienen dazu, die sogenannten Nebelbilder zu liefern. Indem dieselben auf der nämlichen Stelle der Wand ein Bild entwerfen, bringt man durch abwechselndes langsames Verdecken des einen

*) Athanasius K., geb. 1601 zu Geysa bei Fulda, wurde Jesuit, als solcher zuerst Professor in Würzburg, ging 1635 nach Avignon und starb 1680 als Professor in Rom.

und gleichzeitiges Öffnen des andern die magische Wirkung des Übergehens eines Bildes in ein anderes hervor.

Obgleich nun diese Anwendungen der Sammellinsen die ausgebreitetste Verwendung für Demonstrationen aller Art gefunden haben, so ist doch ihr wirklicher Nutzen gering im Vergleich zu demjenigen, den die Linsen vermöge ihrer Eigenschaft, Lichtstrahlen in bestimmte Richtung zu werfen, gestiftet haben. Zu diesem Zwecke bringt man sie auf mächtigen Türmen an, die an gefährlichen Küstenpunkten errichtet uns erlauben, das Licht hinter ihnen aufgestellter Lampen weit in die See hinauszuwerfen und dadurch dem Schiffer auch des Nachts Punkte, auf die er seinen Kurs richten oder die er meiden muß, kenntlich zu machen. Solche Leuchttürme bauten bereits die Alten, aber die darauf unterhaltenen Feuer leuchteten, indem sie ihr Licht nach allen Seiten zerstreuten, nicht sehr weit, waren auch bei stürmischem Wetter nicht zu unterhalten. Indessen bedurfte die Schiffahrt des Altertums, die sich ja nur an den Küsten hielt, keiner besseren Vorrichtungen. Das änderte sich, seitdem Kolumbus die Wege über den freien Ocean gewiesen hatte, man stellte nun eine Anzahl Kerzen, die unter einem Glashause brannten, auf die Spitze eigens dazu erbauter Türme; aber die so erreichte Verbesserung war ganz unzureichend. Erst unser Jahrhundert brachte, nachdem mancherlei Versuche mit mächtigen Spiegeln und Linsen resultatlos geblieben waren, die großen Fortschritte auf dem Gebiete des Leuchtturmwesens hervor, die sich hauptsächlich an die Namen Fresnel*) und Stevenson**) knüpfen. Man hatte längst erkannt, daß die vorliegende Aufgabe nur mittelst Linsen von

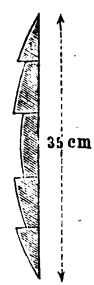
*) Augustin F., geb. 1788 zu Broglie, Dép. de l'Eure, war erst Brücken- und Straßenbaumeister in verschiedenen Departements, wurde vorübergehend unter Napoleon abgesetzt und starb 1827 bei Paris als Ingenieur-en-Chef des Ponts et Chaussées.

**) Hauptsächlich Robert St. (geb. 1772 in Glasgow, gest. 1830 in Edinburgh), Thomas St. und Allan St., alle Ingenieure des Leuchtturmbureaus in Edinburgh.

solchen Dimensionen zu lösen sei, wie sie aus einem Stück Glas in genügender Reinheit gar nicht hergestellt werden konnten. Einen Vorschlag Buffons*) verwirklichend stellte nun 1819 Fresnel die erste brauchbare Zonenlinse dar, die Fig. 45 im Aufriß und Durchschnitte zeigt. Aus der Abbildung ergiebt sich, daß eine solche Linse aus beliebig vielen Stücken besteht, die so geschliffen sind, daß sie zusammengesetzt eine einzige Linse darstellen. Mittelst eines Hohlspiegels, der nach der Landseite zu angebracht wurde, suchte man alsdann alles Licht, das die Lampe entwickelte, seewärts zu werfen und erhielt so Apparate, welche bis auf $7^1/_2$ Meilen Entfernung sichtbar sind. Die

Fig. 45a.

Fig. 45b.



Spiegel ersetzte später Alan Stevenson in der zweckmäßigsten Weise durch total reflektierende Prismen, und so war ein ohne Unterbrechung leuchtendes Licht von hoher Vollkommenheit erreicht.

Nun besitzen aber Frankreichs und Englands Küsten in nicht großen Entfernungen von einander Punkte genug, welche durch Leuchttürme kenntlich zu machen sind. Die benachbarten Punkte müssen deshalb von der See aus unterschieden werden können, wenn man den Seefahrer nicht durch die Türme selbst neuen Gefahren aussetzen will. Der Vorschlag, eine solche Unterscheidung

*) George Louis Leclerc, Graf de B., geb. 1707 in Montbard in der Bourgogne, war Intendant des königlichen Gartens und Naturalienkabinets in Paris, wo er 1788 starb.

durch Vorsetzen verschiedenfarbiger Gläser zu bewirken, bewies sich als unzweckmäßig, da dieselben das Licht der Türme zu sehr schwächten. Deshalb zog man vor, intermittierendes Licht anzuwenden, welches in bestimmten, dem Seefahrer bekannten Zeiträumen einmal für kurze Zeit erlöscht. Dazu hat Fresnel den Apparat angegeben, den die Figuren 46 bis 48 versinnlichen. Der Zonenlinse A, Fig. 46 sind eine Reihe Spiegel oben und

Fig 46.

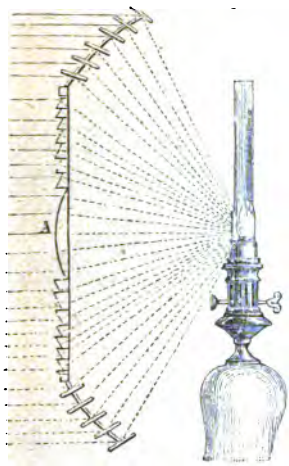
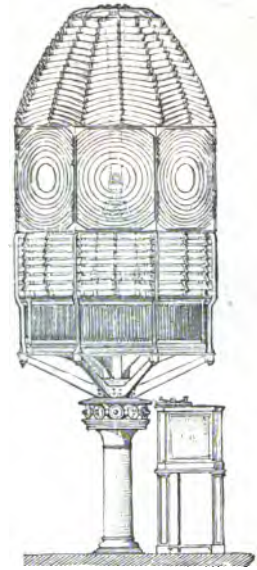


Fig. 47.

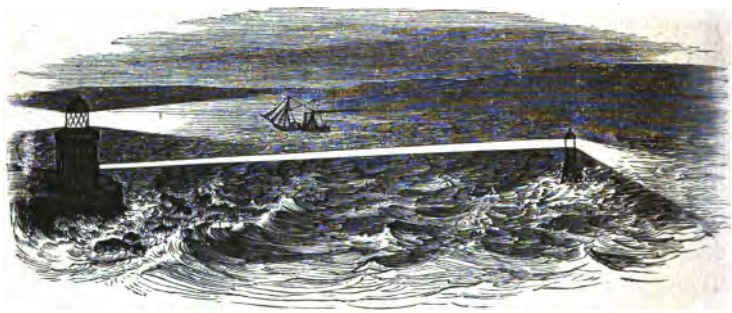


unten zugefügt, welche so gestellt sind, daß das Licht der im Brennpunkte der Linse befindlichen Lampe nicht nur durch diese, sondern auch durch die genannten Spiegel der Achse der Linse parallel weiter geht. Solcher Apparate sind nun eine Anzahl zu einer großen Laterne Fig. 47 zusammengesetzt, welche durch ein Uhrwerk langsam um ihre Achse gedreht wird. Die im Innern des Apparates befindliche Lampe ist nach allen Seiten

LIBRARY OF THE

von schmalen Zonenlinsen umgeben, von denen eine jede in eine bestimmte Entfernung von der Küste eine Lichtgarbe auf die See wirft. Solche Lichtgarben werden also in so viel Richtungen ausgesandt, als Zonenlinsen vorhanden sind, die dazwischen liegenden Stellen aber bleiben dunkel. Während der Rotation des Apparates bestreichen demnach jene Lichtgarben langsam die See und in regelmäßigen Zwischenräumen sieht der Seefahrer das Licht erscheinen und wieder verschwinden. Indem er für die einzelnen Türme die Intervalle des Aufleuchtens kennt, kann er mit der Sekundenuhr in der Hand bestimmen, welches Licht er sieht. Überhaupt ist man jetzt so weit gekommen, daß alle Auf-

Fig. 48.



gaben, die man an Leuchttürme stellen kann, ohne Mühe zu lösen sind. Man kann Klippen beleuchten oder, wenn dieselben untergetaucht sind, ein darauf errichtetes Signal und auf diese Art vor ihnen warnen. So stellt z. B. Fig. 48 den Turm am Eingang des Stornoway-Bay in Schottland dar, der zunächst als Leuchtturm dient, dann aber mittelst eines weiteren Leuchtapparates Licht auf einen kleinen Turm wirft, welcher auf einer untergetauchten Klippe in seiner Nähe gebaut ist. Ein Planspiegel auf der Spitze desselben lenkt die Strahlen dieses zweiten Apparates nach der See ab, in welche Richtung sie durch eine Zonenlinse, soweit nötig, zerstreut werden.

Das Auge und das Sehen.

Wenn das Sprichwort von jemandem, der etwas als seinen kostbarsten Schatz hütet und bewahrt, sagt, er hütet es wie seinen Augapfel, so spricht es einmal damit aus, daß wir etwas kostbareres als unser Auge überhaupt nicht besitzen, aber es deutet zum andern an, daß dieser Besitz auch gehütet werdet muß. Da das Auge ja, wenn es seinen Zweck wirklich erfüllen soll, frei muß umherschauen können, so ist ihm eine solche Stelle angewiesen, die es mancherlei Gefahren aussetzt. Zwar ist es gegen Schläge oder Stöße, die von oben, unten oder von der Innenseite des Gesichtes herkommen, durch drei Knochen, den Augenbrauenbogen, die Jochbeine und das Nasenbein geschützt, an der Schläfenseite aber machen ihm die Knochen zu besserm Ausblicke Platz und ein von dieser Seite es treffender Stoß kann sehr gefährlich werden. Allerdings vermindert der Umstand, daß wir zwei Augen besitzen, die Gefahr, durch einen Unfall das Sehvermögen ganz zu verlieren, da es immerhin unwahrscheinlich ist, daß beide Augen auf einmal zerstört werden.

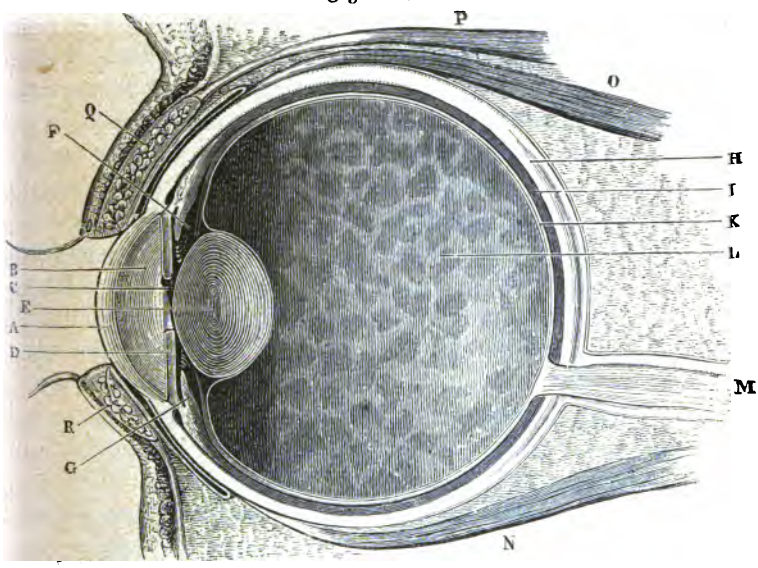
Fig. 49.

Das Auge hat von seiner nahezu kugeligen Form den Namen des Augapfels erhalten. Machen wir uns nun zunächst mit seiner nächsten Umgebung bekannt. Der Augapfel ist in einer mit Fett und Schleimhaut ausgepolsterten Höhle des Schädels, der Augenhöhle eingebettet, die nach hinten spitz zuläuft und dort eine Öffnung hat, durch welche ein starker Nerv, der Sehnerv, vom Gehirn ausgehend, in die Augenhöhle und von da in den Augapfel tritt. Nach vorn kann die Augenhöhle durch zwei Knorpelplatten, die Augenlider, a und b Fig. 49, geschlossen werden, die eine nahezu mandelförmige Öffnung frei lassen, wenn sie hauptsächlich durch Hebung des oberen auseinandergezogen werden. In dieser Öffnung wird dann ein Teil des Augapfels sichtbar. Unter dem oberen Augenlid liegt nach außen bei c eine Drüse,

die Thränendrüse, deren sehr wässeriges Secret, die Thränenflüssigkeit, fortwährend den frei liegenden Teil des Augapfels wäscht und dadurch stets rein und glänzend erhält. Der Reiz, der infolge zu großer Trockenheit dieser Teile entsteht, veranlaßt das obere Augenlid, momentan herabzufallen und dadurch die Flüssigkeit von neuem über sie auszubreiten. Damit die Thränenflüssigkeit nun nicht über die Augenlider herabfällt, sind deren Ränder mit einer Reihe kleiner Drüsen, den Meibom'schen Drüsen, versehen, deren Secret, die Augenbutter, bewirkt, daß diese Ränder stets fettig und so unbenetzbar bleiben. Nur wenn infolge von Gemütsbewegungen, Reizung des Auges durch einen unter die Lider eingedrungenen fremden Körper oder durch zu große Kälte die Thränen besonders reichlich entwickelt werden, fließen sie über die Wangen herab. Für gewöhnlich werden sie durch einen feinen Kanal, den Thränenkanal, entfernt. Derselbe nimmt seinen Anfang an dem höchsten Punkte d des untern Augenlides, wo man ihn als eine feine Öffnung, den Thränenpunkt, erblickt, wenn man das untere Augenlid mit dem Finger ein wenig herabzieht, und endet in der Nasenhöhle, in die die Thränen also abgeführt werden. Der mit Schleimhaut ausgefüllte Teil e, der Thränensee oder das Thränensäckchen, ist ein für das menschliche Auge bedeutungsloses, rudimentäres Organ, welches bei Tieren, namentlich bei Vögeln, als drittes Augenlid, Nickhaut, sehr entwickelt ist. Die Ränder der Lider sind mit steifen Härchen, den Augenwimpern, besetzt, die, bei raschem Schließen des Auges sich in einander verschränkend fremden Körpern, kleinen Insekten z. B., den Eintritt wehren. Ist durch einen unglücklichen Zufall ein solches Körperchen trotzdem in das Auge gelangt, so entfernt man es leicht wieder, indem man das obere Lid über das untere hinzieht und so das erstere mit den Wimpern des letzteren ausbürstet. In seiner Höhle wird der Augapfel durch sechs Muskeln, die Augenmuskeln, bewegt, von denen zwei einander immer entgegenwirken und die ihm alle möglichen Bewegungen erteilen können.

Das Innere des Augapfels stellt Fig. 50 in stark vergrößertem Maßstab dar. Er ist in der Lage gezeichnet, die er bei aufrechter Stellung des Kopfes hat und zwar so, als ob er etwa im gefrorenen Zustande mitten durchschnitten wäre. Dabei ist nur die Stelle des Eintrittes des Sehnerven M etwas verschoben gezeichnet, indem derselbe nicht gerade in dem mittleren Schnitte, sondern an einer mehr nach der Nase zu gelegenen

Fig. 50.



Stelle, also im rechten Auge links, im linken rechts von der Mitte eintritt. Wie ein anderer Apfel auch, ist der Augapfel von einer Schale umgeben, welche aber aus drei Schichten besteht. Die äußerste dieser Schichten heißt weiße oder Sehnenhaut (Sclerotica) und ist in der Figur mit H bezeichnet. Selten ist sie rein weiß, meist gelblich oder bläulich, wie man sich an dem Teile derselben, welcher zwischen den Lidern sichtbar wird, leicht überzeugen kann. Der Teil der Sehnenhaut, welcher bei gerade-

aus blickenden Augen in der Mitte der Augenöffnung sich befindet, ist stärker gewölbt, wovon man sich überzeugt, wenn man den Finger lose auf das geschlossene Auge legt und dasselbe langsam hin- und herrollt; er ist vollkommen durchsichtig, so daß er einen Einblick in das Auge gewährt. Er führt den Namen der Hornhaut (Cornea). Die zweite der Sehnenhaut nach innen anliegende Schale ist die Aderhaut (Chorioidea) I, die ein System von Adern darstellt, welche die Ernährung des Auges besorgen. Die Arterien, welche der Aderhaut das Blut zuführen, durchdringen von beiden Seiten die Sehnenhaut. An der Stelle, wo die Sehnenhaut in die Hornhaut übergeht, verdickt sich die Aderhaut zu einem Ringe, dem Ciliarringe G, welcher einen ringförmigen Muskel F, den Ciliarmuskel, umfaßt. Etwa von der Stelle aus, wo sich das Innere des Augapfels nach vorn wieder verengt, legt sich die Aderhaut in sehr regelmäßige Falten, die Ciliarfalten heißen, aber in der Figur nicht gezeichnet sind. Über den Ciliarring hinaus setzt sich sodann die Aderhaut als Regenbogenhaut (Iris) D fort, die blau, grau, grünlich oder braun gefärbt, vorn im Auge unter der Hornhaut sichtbar wird. In der Mitte der Iris bleibt eine Öffnung frei, die Pupille C, welche bei dem Menschen stets kreisrund, bei Füchsen und den kleineren Katzen im senkrechten Sinne länglich bis spaltförmig, bei Wiederkäuern und Pferden dagegen im horizontalen Sinne länglich ist.

Der Ciliarmuskel dient nur als Fassung einer Sammellinse E, deren hintere Fläche stärker gewölbt ist, wie die vordere und welche den Namen der Krystallinse führt. Diese Linse teilt das Auge in zwei Kammern, in die kleine vordere Augenkammer B von sichelförmigem Querschnitt, welche die ganz durchsichtige wässerige Feuchtigkeit enthält, und in die viel größere hintere Augenkammer L, die eine gallertartige, ebenfalls sehr durchsichtige Masse, der Glaskörper, gänzlich erfüllt. Doch legt sich dieser nicht überall der Aderhaut an, vielmehr liegt der hinteren Hälfte derselben, die mit einem tiefschwarzen Farbstoffe, dem schwarzen Pigmente, überzogen ist, noch eine dritte Schale

auf, die Netzhaut (Retina) K, welche nichts anderes ist, als die ausgebreiteten Enden des Sehnerven M. Auf der Netzhaut befindet sich gerade der Pupille gegenüber eine etwas vertiefte Stelle von der Größe eines Hirsekornes, der gelbe Fleck. Zieht man von diesem nach dem Mittelpunkt der Pupille eine gerade Linie, so erhält man die Sehachse oder Augenachse. Q und R stellen die Augenlider, P, O und N die Muskeln vor, die die Bewegung des Auges bewirken.

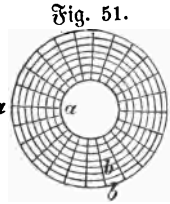
Diese genaue Betrachtung der Figur hat nun längst die Ähnlichkeit des Auges mit einer Camera obscura hervortreten lassen. Wässerige Feuchtigkeit und Krystallinse bilden zusammen die Linse, die Netzhaut die Hinterwand derselben. Die Messungen Listings*) haben nun ergeben, daß man das Bild eines Lichtpunktes auf der Netzhaut einfach erhält, indem man von ihm eine gerade Linie durch einen andern Punkt zieht, welcher auf der Augenachse 4 mm vor der hinteren Fläche der Krystallinse, also noch in dieser, liegt und Knotenpunkt genannt wird. In dieser Linie sehen wir stets die Lichtpunkte, von denen Lichtstrahlen in unser Auge fallen, und was von den Punkten gilt, gilt von den Gegenständen, welche aus Punkten bestehen.

Soll also ein Gegenstand deutlich gesehen werden, so muß er ein scharfes Bild auf der Netzhaut entwerfen. Erhalten wir nun aber ein solches von einem nahe liegenden Gegenstand, so müssen fernere Gegenstände undeutlich gesehen werden und umgekehrt. Nun weiß aber jeder aus eigener Erfahrung, daß man nach Belieben bald fernere, bald nähere Gegenstände deutlich sehen, daß man für beide das Auge accommodieren kann. Dazu muß somit ein Mechanismus vorhanden sein, also, wie man früher in allzu genauem Anschluß an die Einrichtungen der Camera obscura schloß, entweder die Linse oder der Augenhintergrund verschoben werden können. Bewegungen der Linse aber hätte man beobachten

*) Joh. Benedikt L., geb. 1808 in Frankfurt a. M., war erst Lehrer der Maschinenkunde in Hannover, seit 1839 Professor in Göttingen, wo er Ende 1882 starb

müssen, da man dies nicht that, so glaubte man lange Zeit, beim Accommodieren auf nähere Gegenstände ginge der Augenhintergrund vor, das Auge würde also kürzer, während es beim Sehen in größere Entfernungen in ähnlicher Weise länger würde. Man übersah dabei, daß ja auch dann, da die Augenrückwand fest an der Wand der Augenhöhle anliegt, die Accommodation Bewegungen des vorderen Auges hätte zur Folge haben müssen. Da solche aber nicht eintreten, so erwies sich auch diese Annahme als unmöglich. Wie aber soll dann die Accommodation zustande kommen, da eine weitere Möglichkeit nicht vorhanden zu sein scheint? Erst Helmholtz*) gelang es nicht nur eine solche nachzuweisen, sondern auch auf experimentellem Wege zu zeigen, daß eben diese im Auge verwirklicht ist. Unter sonst gleichen Umständen entwirft, wie wir sahen, eine kugeligere Linse das scharfe Bild eines Körpers in größerer Nähe, als wenn sie weniger kugelig ist, es kann also das Auge accommodieren, indem die Linse sich mehr oder weniger wölbt. Da nun auf diese Weise die Accommodation zustande kommt, so muß sie durch den Ciliarmuskel bewirkt werden; die Fähigkeit desselben aber, beide Wirkungen auf die Linse auszuüben, leitet Helmholtz aus seiner anatomischen Beschaffenheit ab. Der Muskel besteht, wie es Fig. 51 schematisch darstellt, aus zwei Arten von Fasern, radialen aa und kreisförmigen bb, von denen die ersteren also mit einem Ende am Rande der Linse befestigt sind. Verkürzen sich diese so wird die Linse auseinander gezogen, also flacher, während eine Verkürzung der kreisförmigen Fasern die radialen wieder verlängert und dabei eine Zusammendrückung der Linse zur Folge hat.

Fig. 51.



Damit sind aber die bei der Accommodation stattfindenden Vorgänge durchaus noch nicht erschöpft. Die Iris zeigt nämlich ganz

*) Herm. H, geb. 1821 in Potsdam, war erst Militärarzt, dann Professor zu Königsberg, Bonn und Heidelberg, ist jetzt Professor in Berlin.

die nämliche Textur, wie der Ciliarmuskel; sie besteht aus einer vorderen, von außen sichtbaren Lage von radialen Fasern und einer Lage von cirkularen Fasern, welche der Linse aufliegen. Die Iris ist also ebenso ein Muskel, wie der Ciliarmuskel und macht reflektiv alle Bewegungen des letzteren mit. Sie verengert beim Sehen in die Nähe die Pupille und erweitert sie wieder, wenn ferne Gegenstände fixiert werden. Von näheren Gegenständen kommt also weniger Licht in das Auge, doch werden sie schärfer gesehen, da die sphärische Aberration fast ganz wegfällt, während beim Sehen von ferneren Gegenständen dieselbe nicht vermieden ist. Aber auch bei den Bildern, welche von diesen entworfen werden, kann sie nicht störend wirken, weil das Licht, welches von ihnen in das Auge gelangt, dafür zu schwach ist. Vielmehr ist in diesem Falle der größere Vorteil erreicht, daß mehr Licht in das Auge gelangt, als ohne diese Erweiterung der Pupille der Fall sein würde.

Die Kontraktionen der Fasern des Ciliarmuskels sind aber nicht die einzigen Ursachen, die eine Veränderung in der Größe der Pupille bewirken. Die Iris reagiert ebenso, wenn sie plötzlich von starkem Lichte getroffen wird. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man vor dem Spiegel ein Licht, welches man seitwärts vom Kopfe hielt, plötzlich vor das Auge bringt, indem man zugleich fortwährend das Spiegelbild der Iris fixiert. Man sieht wie die Pupille plötzlich enger wird, die Iris aber, gerade so, als ob sie im ersten Schrecken sich übereilt habe, nun die Pupille wieder erweiternd und verengernd mehrmals hin und her schwankt.

Wenn nun dieser Zusammenhang der Bewegungen des Ciliarmuskels und der Iris als eine sehr vollkommene Einrichtung uns entgegentritt, so scheint die folgende Eigentümlichkeit des Auges gerade das Gegenteil zu ergeben. Die Nerven sind nur da geeignet Empfindungen aufzunehmen, wo sie endigen. An der Stelle aber, wo der Sehnerv in das Auge eintritt, befinden sich keine Nervenenden; sie muß also blind sein. Niemand wird jedoch zugeben wollen, daß er in seinem Auge einen Fleck habe, der

nichts sehen könne, von solcher Ausdehnung, daß das Bild einer in 20 cm Abstand befindlichen Haselnuß darauf bequem Platz hat. Daß dies jedoch der Fall ist, ist schon im Jahre 1668 von Mariotte*) durch folgenden Versuch nachgewiesen worden, welcher alle seine Zeitgenossen in das lebhafteste Erstaunen versetzte. Man stelle in etwa 20 cm Entfernung das rechte Auge so über Fig. 52 auf, daß es sich gerade über dem links gezeichneten Kreuzchen befindet, fixiere dasselbe und schließe das linke Auge. In dem Augenblicke verschwindet der große weiße Kreis, der rechts gezeichnet ist. Sollte ein Teil sichtbar bleiben, so nähere oder entferne man das Auge etwas und der behauptete Erfolg wird eintreten. Daß alsdann das Bild des rechtsgelegenen

Fig. 52.

Kreises auf die Eintrittsstelle des Sehnerven fällt, welche der blinde oder Mariottesche Fleck heißt, kann man leicht durch Messung finden. Donders**) hat es indessen auch so nachgewiesen, daß er in das Auge eines Menschen mittelst eines Augenspiegels das Bild einer Lichtflamme auf den blinden Fleck entwarf, der bei solcher Betrachtung als eine runde weißliche Stelle im Auge erscheint, von der aus sich als Mittelpunkt einige Äderchen in der Netzhaut verzweigen. Derjenige, in dessen Auge das Licht

*) Edmonde M., geb. in der Bourgogne, war Prior eines Klosters bei Dijon, dann Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Paris, wo er 1684 starb.

**) Franz Cornelis D., geb. 1818 in Tilburg, ist Prof. in Utrecht.

geworfen wurde, hatte keine Lichtempfindung, so lange das Flammenbild auf den blinden Fleck fiel, sowie es darüber hinausging, trat sie auf.

Im Gegensatze zum blinden Fleck, welchem alle empfindungsfähigen Nerven fehlen, besitzt der gelbe Fleck auf kleinem Raume die verhältnismäßig größte Zahl derselben. Er ist also ganz besonders für scharfes Sehen organisiert und in der That richten wir das Auge stets so, daß das Bild des fixierten Gegenstandes auf das Ende der Augenachse, also den gelben Fleck fällt. Nun ermüdet aber jeder Nerv bei angestrengter Thätigkeit sehr rasch und bedarf dann zu seiner Erholung einer kurzen Ruhe. Diese verschaffen sich die Nerven des gelben Fleckes, indem sie das Auge zu einer Bewegung antreiben, die nicht größer zu sein braucht, als daß ein anderes Bild an der Stelle des betrachteten erscheint. Dadurch verschwindet das eben fixierte Bild nicht aus dem Auge, es bleibt vielmehr auf einem seitlichen Teile der Netzhaut, wenn auch in geringerer Deutlichkeit bestehen. Umgekehrt bewirkt die Beweglichkeit des Auges, daß jede Stelle des Gesichtsfeldes, die einen besondern Reiz auf die Netzhaut ausübt, zur bessern Musterung sofort auf den gelben Fleck gebracht wird, indem sich unwillkürlich die Augenachsen auf den jenen Reiz bewirkenden Gegenstand einstellen. Darin liegt der Grund, daß uns das Vorhandensein des blinden Fleckes gewöhnlich ganz entgeht; indem wir alle Aufmerksamkeit auf die Bilder richten, die auf dem gelben Fleck entworfen werden, berücksichtigen wir die stets undeutlich geschauten seitlichen nur insoweit, als es für uns von Bedeutung ist, zu wissen, daß die Gegenstände, welche sie verursachen, vorhanden sind. Sollte uns hierbei jemals auffallen, daß ein Teil eines solchen Gegenstandes, etwa der Kopf eines Menschen fehlte, so genügt ein rascher Blick nach demselben, ein momentanes Einstellen der Augenachsen auf ihn, um uns darüber aufzuklären. Bei bekannten Gegenständen scheint uns somit ein solcher Mangel sich aus der geringen Schärfe der zur Seite liegenden Bilder zu erklären, und wir ergänzen Fehlendes leicht

aus dem Gedächtnis. Es tritt aus dem Gesagten übrigens auch deutlich der Einfluß hervor, welchen diese Organisation der Netzhaut auf die Form unseres Denkens ausübt. Während ein Gegenstand den Inhalt unserer Vorstellungen bildet und nach allen Richtungen uns klar und scharf vor unserem Geiste steht, sind gleichzeitig eine große Menge anderer dunkel in unserm Gedächtnisse vorhanden und können entweder nach Belieben oder indem sie jenen verdrängen, an dessen Stelle treten. Ebenso wie eine nicht leicht zu erlangende Übung dazu gehört, das Auge abzuhalten jedem Reiz zu folgen, ist es auch nicht leicht, das Eintreten neuer Vorstellungen nur vom Willen abhängig zu machen.

Die Thatsache nun, daß wir alle Gegenstände, die wir sehen, in die Richtung der Verbindungslinie des Knotenpunktes mit dem Bilde des betreffenden Gegenstandes auf der Netzhaut versetzen, räumt in einfachster Weise eine Schwierigkeit aus dem Wege, die den „Weisen" früherer Zeiten unglaublich viel Kopfzerbrechen gemacht hat. Sie konnten sich durchaus nicht erklären, warum wir die Gegenstände aufrecht sehen, da ihre Bilder auf der Netzhaut doch umgekehrt sind. Es liegt auf der Hand, daß nach dem Obigen die Frage nur Sinn hat, wenn man sie umkehrt. Denn da der unten gesehene Punkt stets nach oben versetzt wird, so würde es schlechterdings unverständlich sein, wie er jemals unten gesehen werden könnte.

Durch das so auf der Netzhaut entworfene Bild werden die auf derselben direkt neben einander liegenden Nervenenden gereizt und dieser Reiz bewirkt die Empfindung des Lichtes. Gereizte Nerven pflegen aber nicht sofort in den empfindungslosen Zustand wieder überzugehen, und so dauert auch im Sehnerven die Empfindung kurze Zeit hindurch an. Daher kommt es z. B., daß wenn wir ein glimmendes Zündholz im Kreise rasch herumschwingen, anstatt des leuchtenden Punktes ein leuchtender Kreis von uns gesehen wird. Ehe ein Gesichtseindruck an irgend einer Stelle des Kreises erloschen ist, entsteht wieder ein neuer und es

glaubt unser Auge einen leuchtenden Kreis zu sehen, wo unser Gefühl uns keinen Augenblick in Zweifel läßt, daß es eben nur ein rasch rotierender Punkt ist. Von den mancherlei Spielereien, die man auf diese Dauer unserer Gesichtseindrücke gegründet hat, führen wir hier nur das Thaumatrop an, eine oben offene Trommel von Pappe, in deren Mantel in regelmäßigen Abständen Spalten geschnitten sind, während die Trommel in rasche Rotation um eine Achse versetzt werden kann. In die Trommel kann ein Streifen mit farbigen Bildern so gelegt werden, daß derselbe sich unterhalb der Schlitze befindet. Diese Bilder stellen Figuren dar in verschiedenen aufeinanderfolgenden Stellungen, die sie annehmen, wenn sie sich bewegen, und zwar trägt jeder Streifen ebensoviele Bilder als Spalten vorhanden sind und diese in denselben Abständen, wie die Schlitze. Läßt man nun die Trommel rotieren und sieht durch die vor dem Auge vorbeieilenden Spalten, so bilden sich nach einander die Figuren in unserem Auge ab, bei rascher Drehung aber ist der eine Gesichtseindruck noch nicht erloschen, wenn der folgende bereits eintritt. Wie beim Sehen wirklicher Bewegung scheint also eine folgende Stellung an eine vorhergehende sich unmittelbar anzuschließen und es wird dadurch die Täuschung einer solchen Bewegung hervorgerufen.

Sollen nun zwei Punkte als getrennte unterschieden werden, so müssen ihre Bilder auf der Netzhaut einen Abstand von mindestens 0,0044 bis 0,0045 mm haben. Dieser Abstand muß abnehmen, wenn der Gegenstand sich vom Auge entfernt, weil dabei der Winkel, welcher die Verbindungslinie jener beiden Punkte mit dem Knotenpunkte bildet, der Gesichtswinkel kleiner wird. Gelangt also ein Gegenstand in so große Entfernung vom Auge, daß die Bilder seiner Grenzpunkte weniger als 0,0044 mm von einander entfernt sind, so muß er dem Auge verschwinden, es sei denn daß das Licht, welches er aussendet, stark genug ist, um einen intensiven Reiz auf die Netzhaut auszuüben. Dann bleibt er zwar sichtbar, erscheint aber nun als Lichtpunkt ohne jegliche

Form; als solche Lichtpunkte sehen wir die Sterne, für die ja die obigen Voraussetzungen in hervorragender Weise erfüllt sind. Was aber von den Gegenständen selbst gilt, gilt auch von ihren einzelnen Teilen, je näher der Gegenstand sich dem Auge befindet, desto mehr und desto kleinere Teile desselben kann man sehen, während dies Detail mehr und mehr verschwindet, wenn er sich weiter entfernt.

Aus der Größe des Gesichtswinkels und der Menge des unterscheidbaren Details pflegen wir Entfernung und Größe eines entfernten Gegenstandes zu beurteilen. Da nämlich ein naher Gegenstand an seinem großen Gesichtswinkel und der großen Menge unterscheidbaren Details als ein nahe gelegener erkannt wird, so sind wir gezwungen einen Gegenstand von kleinem Gesichtswinkel für sehr entfernt und also sehr groß zu halten, wenn wir sehr viel Einzelheiten an ihm unterscheiden können und umgekehrt. Eine aus irgend welchem Grunde eintretende Trübung der Atmosphäre bewirkt nun, daß das Detail fernerer Gegenstände immer mehr unserm Auge verschwindet, während der Gesichtswinkel unverändert bleibt, wir müssen sie dann für größer halten, als wir dies bei durchsichtiger Luft thaten. Deshalb erscheinen die Berge von demselben Standpunkte aus zu verschiedenen Zeiten betrachtet bald höher, bald niedriger, bald näher, bald ferner, ebenso erscheinen Gegenstände im Nebel viel größer, als sie wirklich sind. Hieraus hat man weiter die Thatsache zu erklären gesucht, daß Sonne und Mond in der Nähe des Horizontes viel größer aussehen, als wenn sie hoch am Himmel stehen, obwohl der Gesichtswinkel sich nicht ändert. Gegen eine solche Erklärung ist jedoch einzuwenden, daß auch die Entfernung zweier Sterne beim Auf- und Untergang viel größer zu sein scheint, als in der Nähe des Zeniths, obgleich von unkenntlich werdendem Detail nicht die Rede sein kann. Wenn man somit an den Himmelskörpern auch dieselbe Erscheinung beobachtet, wie bei irdischen Gegenständen, so muß der Grund hierfür doch ein anderer sein. Er liegt, wie Helmholtz gezeigt hat, nicht in

einer Täuschung unserer Sinne, sondern in einer Täuschung unseres Urteils. Bei der Gewohnheit, die wir haben, senkrechte Entfernungen niedriger zu schätzen als horizontale, fassen wir den Himmel stets als ein elliptisches Gewölbe auf. Infolge davon sehen wir die Entfernung von Gegenständen, welche sich in der Nähe des Horizontes befinden, für viel größer an, als wenn dieselben höher stehen, und da der Gesichtswinkel sich nicht geändert hat, so bleibt uns nichts übrig, als sie im Horizonte für größer zu halten.

Die Accommodationsfähigkeit des Auges ist nun aber nicht unbegrenzt. Namentlich giebt es für alle Augen eine geringste Entfernung, innerhalb deren Gegenstände kein scharfes Bild mehr geben können. Der Punkt, bei welchem dieses undeutliche Sehen beginnt, der Nähepunkt, liegt aber nun bei verschiedenen Augen in sehr verschiedenem Abstand und besonders bei Kurzsichtigen dem Auge sehr nahe. Dafür können diese aber auch in oft verhältnismäßig sehr geringen Entfernungen nicht mehr scharf sehen, auch der Fernpunkt liegt dem Auge sehr nahe. Außer der Kurzsichtigkeit, kannte man früher nur noch eine zweite Anomalie des Auges, die Weitsichtigkeit, der man hauptsächlich die Augen alter Leute zum Opfer werden sah. Seitdem haben diese Anschauungen eine gewaltige Änderung erfahren infolge der eingehendsten Untersuchungen, welche die Augenheilkunde zu einem selbständigen Zweige der Medizin erhoben haben. Diese Untersuchungen haben ergeben, daß die Form des Augapfels eine verschiedene sein kann je nach der Länge der Augenhöhle, die wiederum durch die Bildung des Schädels bedingt ist. Danach unterscheidet man die Emmetropen oder Normalsichtigen, die Myopen oder Kurzsichtigen und die Hypermetropen oder Übersichtigen; alle drei Augenarten werden aber presbyopisch oder altersichtig. Die frühere Benennung der Weitsichtigkeit hat man ganz fallen gelassen, da sie in höchst unklarer Weise Übersichtigkeit und Altersichtigkeit zusammenwarf. Beim Normalsichtigen hat das Auge eine mittlere Länge. Durch Accommodation der

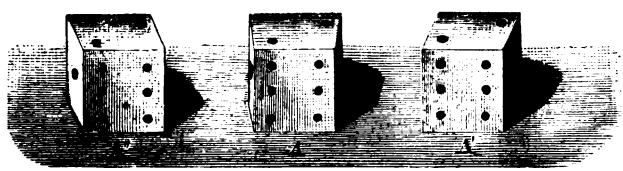
Linse kann ein scharfes Bild eines Gegenstandes, der bis zu 12 cm vom Auge entfernt ist, noch auf der Netzhaut entworfen werden. Accommodiert aber das Auge nicht, so erhält es scharfe Bilder von Gegenständen, die sich in so großen Entfernungen befinden, wie die Sonne und die Sterne. Man sagt deshalb, der Fernpunkt des normalen Auges liege in unendlicher Entfernung. Das Auge des Kurzsichtigen ist im Vergleich mit dem des Normalsichtigen zu lang. Er kann deshalb nie ein scharfes Bild auf der Netzhaut erhalten und somit auch nie ferne Gegenstände scharf sehen, denn dazu müßte seine Linse weniger kugelig werden, als sie wirklich ist. Dies kann aber der Kurzsichtige dadurch erreichen, daß er seinem Auge eine Zerstreuungslinse als Brille vorsetzt. Das Auge des Übersichtigen endlich ist zu kurz und infolge davon ist der Nähepunkt weiter vom Auge weggerückt als bei dem Normalsichtigen. Hochgradige Übersichtigkeit kann dann zur Folge haben, daß nahe Gegenstände nicht mehr scharf gesehen werden können, die entferntesten aber auch nur unter Accommodationsanstrengung. Ließe der Übersichtige seiner Linse ihre Form, so würde sie Lichtstrahlen auf der Netzhaut zu einem Punkte vereinigen, welche konvergierend ins Auge kämen, und derartige Strahlen kommen in der Natur nie vor. Die Linse des Übersichtigen ist mithin für sein Auge zu wenig kugelig, man hilft dem ab, indem man ihm eine Sammellinse als Brille vorsetzt.

Das Älterwerden hat nun zur Folge, daß die Linse härter wird und dem Drucke des Ciliarmuskels allmälig weniger nachgiebt. Dies betrifft aber alle Augen gleichmäßig und bewirkt ein Hinausrücken des Nähepunktes. Der Normalsichtige kann dann z. B. nicht mehr lesen, wenn er dem Mangel der Accommodation seines Auges nicht durch eine zu diesem Zweck vorgesetzte Sammellinse abhilft, und ebenso bedarf der Übersichtige einer stärkeren Brille für die Nähe. An dem Kurzsichtigen aber scheint das Älterwerden spurlos vorüberzugehen, denn er selbst merkt kaum, ob sein Nähepunkt um 1 bis 2 cm herausrückt,

da er in solche Nähe nicht Gegenstände vor sein Auge zu bringen pflegt. So bedarf auch der Kurzsichtige, wenn er zugleich altersſichtig wird, gewöhnlich weiter keiner besondern Brille.

Mit Hilfe von Brillen hat Donders noch eine andere Anomalie des Auges unschädlich zu machen gelehrt, welche den in hohem Grade damit Behafteten richtiges Sehen nahezu unmöglich macht, den Astigmatismus. Sie besteht darin, daß die Hornhaut in verschiedenen Richtungen verschieden stark gekrümmt ist, und infolge davon nur verzerrte Bilder auf der Netzhaut entwirft. Giebt man diesem Auge eine cylindrische Brille, welche nach der einen Richtung eben so viel stärker gekrümmt ist, als es das Auge zu wenig ist, so hebt diese Brille die störenden Wirkungen der Anomalie vollständig auf.

Fig. 53.



Es ist übrigens sehr selten der Fall, daß die beiden Augen eines und desselben Individuums ganz gleich sind. Sind die Unterschiede groß, so muß bei der Auswahl der Brillen darauf Rücksicht genommen werden und man wird sich alsdann, um hierin richtig zu gehen, am besten an den Augenarzt wenden. Die Störungen dagegen, die kleine Unterschiede im Bau der Augen hervorrufen, sind wir gewohnt, nicht zu beachten. Dies scheint freilich auf den ersten Blick kaum möglich, aber wir sind durch unser Sehen mit zwei Augen stets genötigt, so viel verschiedenere Bilder zu einer Vorstellung zu vereinigen, daß jene Störungen vollkommen unbemerkbar sind.

Betrachten wir z. B. einen Würfel, wie er zum Würfelspiel verwendet wird, mit beiden Augen, so werden wir ihn so sehen, wie er durch Fig. 53 A dargestellt ist. Schließen wir nun das

linke Auge, so sehen wir den Würfel so, wie ihn A', und wenn wir dasselbe mit dem rechten Auge thun, so wie ihn A" darstellt. Diese beiden recht verschiedenen Ansichten desselben Körpers werden also zu einer einzigen zusammengefaßt, indem der in der Empfindung der Nerven entstehende Konflikt auf psychischem Wege gelöst wird. Macht man den Versuch mit großer Aufmerksamkeit, so bemerkt man leicht, daß während die Bilder in jedem Auge flächenhaft erscheinen, das von beiden aufgefaßte uns den Würfel als körperlich zeigt. Der für uns notwendigen Zusammenfassung der zwei verschiedenen Bilder zu einer Vorstellung, die genau genommen unmöglich ist, verdanken wir also die Vorstellung der dritten Dimension, beide Bilder gehen in eins zusammen, aber dies eine zeigt, im Gegensatz zu den beiden es hervorbringenden, Ausdehnung nach der Tiefe.

Ein solches Zusammenfassen der verschiedenen Eindrücke geschieht aber keineswegs in allen Fällen. Sind nach längerem Sehen in die Nähe unsere Augen ermüdet, so neigen wir dazu, vor uns hinstarrend die Gegenstände doppelt zu sehen. Sie erscheinen dann zugleich undeutlich und man bemerkt leicht, daß sich unsere Augenachsen gleichzeitig mehr parallel stellen. Daraus ergiebt sich, daß die Augenmuskeln und der Ciliarmuskel mit einander ihren Dienst versagen, deren unwillkürliches Zusammenwirken uns ja bereits oben entgegengetreten ist. Die Undeutlichkeit der Bilder, die dann in unseren Augen entworfen werden, kann nun an der Verdoppelung derselben nicht Schuld sein. Wäre sie es, so würden wir stets doppelt sehen müssen, denn auch wenn wir einen Gegenstand fixieren, entwirft seine Umgebung undeutliche Bilder von ihm auf den dem gelben Fleck benachbarten Netzhautstellen. Es bleibt mithin nichts übrig, als anzunehmen, daß gewisse Stellen des Augenhintergrundes in beiden Augen die Eigenschaft haben, auf sie fallende Bilder in eines zu vereinigen, welche anderen fehlt. Die Netzhautstellen, denen jene Eigenschaft zukommt, heißen identische. Die Sache selbst steht keineswegs vereinzelt da, auch an den Fingern besitzen

wir solche Stellen, wie leicht durch folgenden Versuch nachgewiesen werden kann. Man nehme zwischen den Zeigefinger und Mittelfinger in gewöhnlicher Lage derselben eine Erbse, so daß dieselbe an die beiden einander zugewendeten Fingerflächen zu liegen kommt. Schließt man nun die Augen und richtet seine Aufmerksamkeit lediglich auf die Wahrnehmungen des Gefühls, indem man von denen des Gesichtssinnes abstrahiert, so ist das Resultat das, daß wir wirklich glauben eine einzige Erbse zu halten. Schlagen wir aber nun beide Finger übereinander und klemmen die Erbse so hinein, daß sie an die beiden gewöhnlich von einander abgewandten Flächen desselben zu liegen kommt, so haben wir die Empfindung von zwei Erbsen, die wir halten, obwohl wir ganz genau wissen, daß dies nicht der Fall ist. Die einander zugewandten Fingerflächen sind also identische Stellen, die abgewandten nicht.

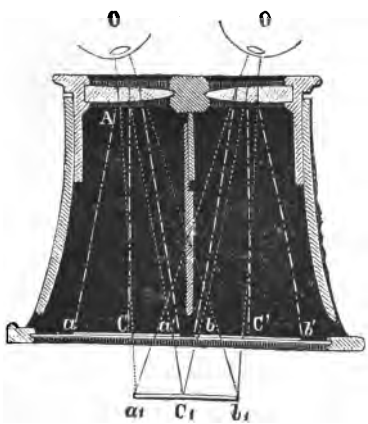
Auf solche identische Stellen fallen die Bilder eines Gegenstandes also nur, wenn die die Augenbewegung vermittelnden Muskeln eine gewisse verhältnismäßige Stärke haben. Ist dies nicht der Fall, *schielen* die Augen, so werden sie immer Doppelbilder geben müssen.

Von den so hervorgerufenen Störungen können sich die Schielenden nur dadurch wenigstens einigermaßen frei machen, daß sie sich gewöhnen, die Bilder des einen Auges vollständig zu vernachlässigen. Glücklicherweise hat die Operation solcher Augen für die neuere Augenheilkunde keine Schwierigkeit mehr, der zu stark wirkende, also zu kurze Muskel wird am Augapfel durchschnitten und heilt dann gewöhnlich von selbst an der richtigen Stelle an. Doch thut man wohl, bei schielenden Kindern die Operation so früh wie möglich vorzunehmen, um den Nachteil, den das Schielen immer auf die Entwicklung des Kindes haben muß, bei Zeiten zu beseitigen.

Daß wirklich das räumliche Sehen das Resultat des Bestrebens ist, die beiden auf identische Netzhautstellen fallenden Bilder desselben Gegenstandes zu einem einzigen zu vereinigen,

findet seine Bestätigung in dem Sehen durch das Stereoskop. Dieser von Wheatstone*) erfundene Apparat bezweckt, zwei Bilder eines und desselben Gegenstandes, welche so aufgenommen sind, wie sie sich in beiden Augen beim Anblicken desselben abbilden würden, auf identische Netzhautstellen zu werfen und auf diese Weise mit Hilfe von Abbildungen Darstellungen, die körperlich erscheinen, hervorzurufen. Fig. 54 zeigt im Durchschnitt die bekannte Form des Apparates, die ihm Brewster**) gegeben und die infolge ihrer viel zweckmäßigeren Anordnung den Wheatstone'schen Apparat gänzlich verdrängt hat. Das Brewster'sche Stereoskop besteht aus einem vierseitigen Kasten, welcher sich nach der einen Seite zu verjüngt. In die verjüngte obere Öffnung dieses Kastens sind zwei Halblinsen eingesetzt, deren scharfe Kanten nach innen liegen. Von der Fassung derselben ausgehend teilt eine Scheidewand den Apparat in zwei Teile und läßt an der den Linsen gegenüberliegenden Seite nur so viel Raum übrig, daß ein Karton oder eine Glastafel mit Photographien hindurchgeschoben werden kann. Die letzteren sind mit aca' und bc'b' bezeichnet. Die Wand, auf der sie aufliegen, besteht aus Milchglas oder fehlt ganz, so daß man die auf Glas

Fig. 54.



*) Charles W., geb. 1802 in Gloucester, war anfangs Verfertiger musikalischer Instrumente, dann Prof. der Physik, zuletzt Privatmann in London, wo er 1880 starb.

**) Sir David B., geb. 1781 in Sedburgh in Schottland, war erst Pharmaceut, dann Advokat, zuletzt Prof. in St. Andrews; er starb 1868.

befindlichen Photographieen gut beleuchtet sieht, wenn man den Apparat gegen das Licht hält; um dasselbe bei den auf Karton aufgezogenen zu erreichen, muß eine an der Seitenwand des Apparates angebrachte Klappe geöffnet werden. Bringt man nun die Linsen vor die beiden Augen O, so sieht man durch die als Lupen wirkenden Halblinsen die Bilder vergrößert, aber auch an derselben Stelle $a_1 c_1 b_1$, indem die Linse den Strahl A z. B. so ablenkt, als käme er von a' u. s. w. Die punktierten Linien stellen demnach die von a,c,a', b,c,b' ausgehenden Strahlen vor, die durch die Linsen solche Richtungen bekommen, als kämen sie von a_1, c_1, b_1. Um für jedes Auge eine scharfe Einstellung der Bilder zu ermöglichen, ist der die Linsen tragende Teil des Kastens gegen den übrigen verschiebbar gemacht. Die für Stereoskopenbilder bestimmten Photographieen endlich werden so hergestellt, daß man von zwei verschiedenen Standpunkten aus die betreffenden Gegenstände aufnimmt. Gewöhnlich wählt man die Entfernung dieser beiden Punkte größer als die Entfernung beider Augen; dadurch erscheinen die Gegenstände im Stereoskop viel näher, als ihnen der Beschauer in Wirklichkeit kommen kann, und dies ist der Grund, warum Statuen, Menschen ꝛc. in stereoskopischer Abbildung leicht wie Puppen aussehen.

Fernrohr und Mikroskop.

Wie wir sahen, hängt die Möglichkeit, zwei Punkte als getrennte zu unterscheiden, von der Größe des Gesichtswinkels ab, unter welchem die von ihnen ausgehenden Strahlen in unser Auge gelangen. Die Grenzen, die dadurch der Wahrnehmungsfähigkeit desselben gesteckt sind, können demnach in dem Maße erweitert werden, als es uns gelingt, den Gesichtswinkel, unter welchem ein Körper erscheint, zu vergrößern, und dies erreichen wir für ferne Gegenstände mittelst des Fernrohrs, für sehr nahe mittelst des Mikroskops.

Beide Apparate gehören zu der großen Zahl von Erfindungen, deren Urheber man nicht kennt. Deshalb dürfen wir

die Menschheit aber nicht des Undanks gegen die Männer zeihen, die ihr Instrumente geschenkt haben, denen unser Jahrhundert den größten Teil seiner Kenntnisse verdankt. Man hat sich in neuerer Zeit redlich bemüht, das Dunkel, das die Erfindungsgeschichte beider einhüllt, aufzuhellen, vollständig ist dies aber nicht gelungen. Den Anteil, welchen einzelne Männer daran nahmen, hat man nicht genügend feststellen können, die Art aber, wie die Erfindung zustande gekommen ist, hat sich so ziemlich aufklären lassen.

Der Zufall hat dabei eine große Rolle gespielt. Um das Ende des 13. Jahrhunderts waren in Italien die Brillen in Gebrauch gekommen und mit ihrer rasch zunehmenden Verbreitung hatte die Kunst der Herstellung der Brillengläser Schritt gehalten. Von Italien hatte sich dieselbe in das betriebsame Holland verbreitet und gegen das Ende des 16. Jahrhunderts lebten namentlich in Middelburg in Seeland eine große Anzahl Brillenschleifer. Da nun die verschiedenen Fernrohre und das zusammengesetzte Mikroskop, um welches es sich hier hauptsächlich handelt, in ihren einfachsten Formen nichts weiter, als Kombinationen zweier Linsen sind, so kann es weniger verwundern, daß Männer, welche tagtäglich die verschiedensten Linsen unter Händen hatten, auch einmal darauf kamen, zwei derselben in verschiedenen Entfernungen vor einander zu halten und hindurchzusehen, als daß dies nicht schon viel früher geschah wie 300 Jahre nach Erfindung der Brillen. Ja es soll sogar die Erfindung von Kindern gemacht sein, die mit den Gläsern in ihres Vaters Laden gespielt und so den Grund zu dem Aufblühen der Naturwissenschaften gelegt hätten.

Soweit die geschichtliche Forschung hat dringen können, so ist das Mikroskop zuerst von dem Brillenmacher Zacharias Janssen*) um 1590, das Fernrohr von einem geborenen Deutschen Hans Lippershey**) um 1608 in Middelburg hergestellt. Während

*) Näheres über seine Lebensverhältnisse ist nicht bekannt.

**) Hans L., geb. zu Wesel, starb 1619 als Brillenmacher zu Middelburg.

aber das erstere zunächst unbeachtet blieb, bemächtigte sich das Genie Galileis*) des zweiten, erfand es, wie er uns selbst erzählt noch einmal und machte damit in rascher Aufeinanderfolge die berühmten Entdeckungen, welche die Anschauungen der damaligen Zeit vom Weltall über den Haufen warfen und vor allem dazu beitrugen, dem von Coppernicus aufgestellten Sonnensystem zum Siege zu verhelfen. Mit Recht heißt deshalb dies Fernrohr das holländische oder das Galilei'sche. Es ist dasjenige, welches seiner bequemen Form wegen in neuerer Zeit als Opernglas oder Feldstecher die ausgebreitetste Verwendung gefunden hat.

Fig. 55.

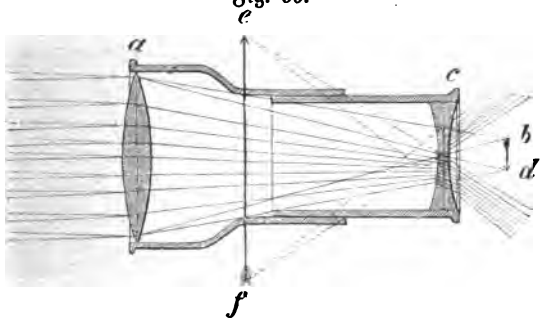


Fig. 55 stellt es im Durchschnitt dar. Eine Sammellinse a und eine Zerstreuungslinse c sind in ein Rohr gefaßt, so daß jene sich an dem weiteren, diese sich an dem engeren Ende desselben befindet. Man hält nun das Rohr mit c, dem Okular, vor das Auge, während man es so richtet, daß a, das Objektiv, dem zu betrachtenden Gegenstande zugekehrt wird. Die auf a fallenden Strahlen würden, wenn c nicht vorhanden wäre, ein umgekehrtes Bild bd entwerfen, indem die Strahlen des obersten Punktes des Gegenstandes in d, die des untersten in b vereinigt

*) Galileo G., geb. 1564 zu Pisa, war von 1593—1609 Prof. zu Padua, von da an zu Pisa, wohnte später, als ihm das Lehren verboten worden war, zu Siena, dann bei Florenz. Er erblindete 1637 und starb bei Florenz 1642.

OF THE

würden. Die zwischengesetzte Zerstreuungslinse aber verhindert, daß die Strahlen bis zu ihrem Durchschnitte gelangen. Sie richtet sie vielmehr so, daß es nur den Anschein hat, als kämen die ersteren von dem Punkte e, die letzteren von dem Punkte f, und da dies mit allen dazwischen liegenden Strahlen in ähnlicher Weise geschieht, so erscheint in ef ein aufrechtes Bild des Gegenstandes. Die Strahlen, welche in e ein Bild des Gegenstandes geben, sind in größerer Anzahl gezeichnet, von den uns das Bild in f gebenden nur die äußersten. Das Bild ist nun freilich viel kleiner als der Gegenstand selbst; da es aber in viel geringerer Entfernung vom Auge sich befindet als dieser, so ist der Gesichtswinkel, unter dem es erscheint, viel größer und das Auge dadurch in die Lage versetzt eine viel größere Menge von Detail zu sehen. Der Gang der Strahlen in dem Fernrohr läßt deutlich erkennen, wie das möglich ist. Soll dies Fernrohr zur Betrachtung so entfernter Gegenstände, wie die Himmelskörper sind, dienen, so läßt sich mit ihm allerdings nur ein sehr kleiner Teil des Himmels übersehen, und es ist dadurch ziemlich mühsam, einen bestimmten Gegenstand aufzusuchen.

Diese Unvollkommenheit wurde Grund, daß für alle Betrachtungen am Himmel das astronomische Fernrohr, welches Kepler*) 1610 konstruierte, das holländische sehr bald verdrängte.

Sollte die neuerdings von niederländischer Seite ausgesprochene Vermutung sich bestätigen, daß es gerade dies Fernrohr gewesen sei, welches die Janssenschen Kinder spielend gefunden hätten, so würde dadurch Keplers Ruhm in nichts geschmälert. Denn ihn haben theoretische Gründe auf seine Erfindung geführt. Fig. 56 zeigt, daß es aus zwei Sammellinsen a und b besteht, von denen die eine ein umgekehrtes Bild des Gegenstandes entwirft, welches von der anderen vergrößert, von dem

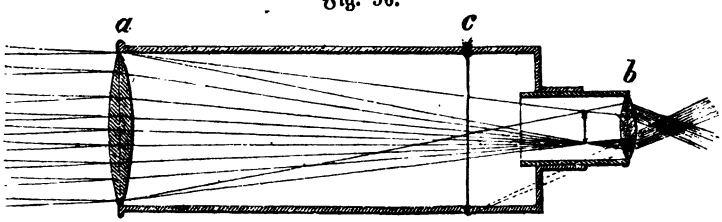
*) Johannes K., geb. 1571 zu Weil der Stadt, war erst Prof. in Gratz, wurde dann Gehilfe Tycho Brahes; dann kaiserlicher Hofastronom und Prof. in Linz. Er starb 1630 in Regensburg.

durch b blickenden Auge in c gesehen wird. Dies Fernrohr läßt die stärksten Vergrößerungen zu, zeigt aber die Gegenstände stets umgekehrt.

Für die Betrachtung irdischer Gegenstände liegt hierin ein großer Übelstand. Deshalb setzte 1645 Schyrlaeus*) zwischen das Okular und das Objektiv ein System von zwei weiteren Linsen, welches lediglich die Bestimmung hat, das Bild, freilich auf Kosten seiner Helligkeit, umzukehren.

Um nun die Deutlichkeit der Bilder, die man durch diese Fernrohre, die Refraktoren, erhält, möglichst wenig zu beeinträchtigen, muß Sorge getragen werden, daß außer den gezeichneten Strahlen keine anderen auf die Linse fallen. Um Reflexionen im Innern des

Fig. 56.



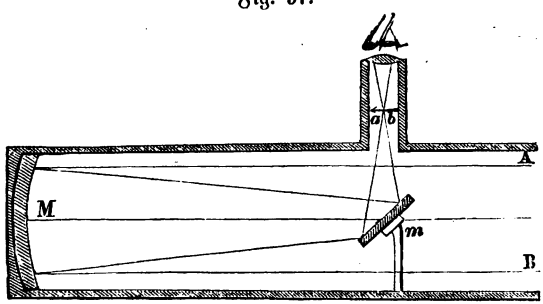
Fernrohrs zu vermeiden, schwärzt man zunächst dasselbe mit glanzloser Farbe und bringt fernerhin überall da, wo die Strahlen sich auf einen kleinen Raum in der Nähe der Achse des Rohres zusammenziehen, geschwärzte Ringe, sogenannte Diaphragmen an, die alles etwa unregelmäßig zerstreute Licht, das in das Fernrohr gelangen würde, vom Okular abhalten. In unseren Figuren sind dieselben weggelassen.

Jedem, der einmal durch ein Opernglas gesehen, namentlich Sterne damit betrachtet hat, muß nun aufgefallen sein, daß dieselben und besonders wenn das Glas schlecht eingestellt war, farbige Ränder zeigten. Diese rühren von einer Unvollkommenheit der Linsen her, auf die wir zurückkommen werden, und wirken

*) Anton Maria Sch., geb. 1597, war Kapuziner im Kloster Rheit in Böhmen. Er starb 1660 in Ravenna.

allerdings höchst störend. Es war natürlich, daß man alles versuchte, sie zu beseitigen, doch schienen die darauf gerichteten Arbeiten wenig Erfolg haben zu können, seit Newton*) die Ansicht vertrat, daß es ganz unmöglich sei diese Farbenränder zu beseitigen, und deshalb damit vorging die Objektivlinse durch einen Hohlspiegel zu ersetzen. Das erste Spiegelteleskop (Reflektor), welches er 1671 mit eignen Händen herstellte, ist noch vorhanden; es besteht aus einem etwa 17 cm langen Rohr, welches vorn offen, hinten aber durch einen Hohlspiegel geschlossen ist in der Weise, wie es die Durchschnittszeichnung Fig. 57 anschaulich macht. Die Brennweite des Spiegels ist so groß, daß er von einem sehr

Fig. 57.



weit entfernten Gegenstand AB in der Nähe der Öffnung des Rohres ein Bild entwerfen würde. Dazu kommt es jedoch nicht, denn ehe die Strahlen hier wieder zusammenkommen, treffen sie auf einen kleinen Planspiegel, welcher einen Winkel von 45° mit der Achse des Fernrohrs bildend in dieser aufgestellt ist und die Strahlen nach ab hinlenkt, wo sie nun ein Bild des Lichtpunktes hervorrufen. Einen ähnlichen Weg verfolgen alle Strahlen, welche von andern Punkten eines Gegenstandes ausgehen. Das von diesem so in ab entstehende Bild wird alsdann durch das Okular, welches als Lupe wirkt, vergrößert. Weil nun der Beob-

*) Isaak N., geb. 1642 in Whoolsthorpe, war erst Prof. in Cambridge, von 1699 königl. Münzmeister in London, wo er 1726 starb.

achter immer in senkrechter Richtung zur Achse des Fernrohres, also nie nach der Richtung sieht, in welcher der zu beobachtende Gegenstand sich befindet, so bedarf er zur Einstellung desselben eines kleinen astronomischen Fernrohrs, des Suchers, welches auf das große so befestigt wird, daß die Achsen beider parallel laufen. Erscheint dann ein Gegenstand im Sucher in der Mitte des Sehfeldes, so erscheint er auch mitten in dem großen Fernrohre. Namentlich in den Händen Wilhelm Herschels*) ist das Newton'sche Spiegelteleskop das Werkzeug für die großen Entdeckungen am Himmel geworden, die seinen Namen unvergeßlich gemacht haben. Die mehrmaligen Durchmusterungen des Firmaments, die wir ihm verdanken, die Entdeckung des Uranus gelangen mit Spiegelteleskopen, die Herschel selbst hergestellt hatte.

Wenn nun Newton hiernach das Verdienst zukommt, das erste Spiegelteleskop hergestellt zu haben, so ist er doch nicht der Erfinder desselben. Diesen Ruhm hat er übrigens auch nie für sich beansprucht, sondern bereitwillig seinem Landsmann Gregory**) abgetreten, der dies Instrument 1661 bereits erdacht hatte, aber aus Mangel an mechanischen Hilfsmitteln erst mit der Verwirklichung seines Gedankens zustande kam, als Newton sein Instrument längst auf den Himmel gerichtet hatte. Das Gregorysche Fernrohr, dessen Verbesserung Newton erstrebte, als er das seinige herstellte, findet auch jetzt noch häufige Anwendung, wir geben deshalb seine Konstruktion in Fig. 58 wieder. Wie bei dem Newton'schen Teleskop ist das Rohr durch einen Hohlspiegel MM geschlossen, der aber in der Mitte eine kleine runde Öffnung hat. In diese hinein fallen die erst von M und dann von einem zweiten kleinen Hohlspiegel m reflektierten

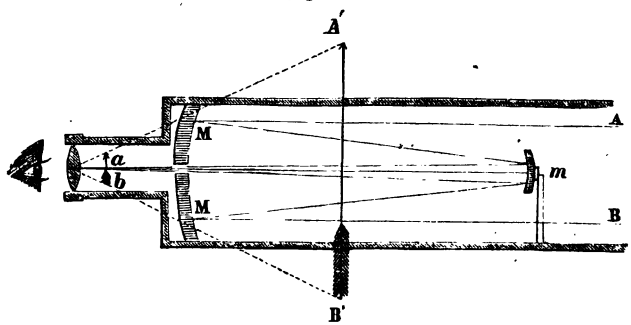
*) Friedr. Wilh. H., geb. 1738 in Hannover, war erst Hautboist, von 1765—82 Organist in Halifax und Bath, von 1782 bis zu seinem Tode königl. Astronom erst in Datchet, dann in Clay-Hall und zuletzt in Slough, wo er 1822 starb.

**) James Gr., geb. 1638 in Aberdeen, war von 1669—1675 Prof. in St. Andrews, dann in Edinburgh, wo er 1675 starb.

Strahlen und entwerfen in ab ein sehr kleines Bild des Gegenstandes AB, welches durch eine Lupe betrachtet wird. Es erscheint so ein aufrechtes Bild A'B'. Um den Spiegel stets in die richtige Entfernung stellen zu können, kann er mittelst Trieb und Schraube, deren Knopf sich neben dem Okularrohr befindet, hin und hergeschoben werden.

Wenn nun auch das Gregorysche Fernrohr vor dem Newton'schen das voraus hat, daß die Achse des Rohres in die Richtung gebracht werden muß, in welcher der Gegenstand sich befindet, so ist es dem letzteren gegenüber dadurch im Nachteil, daß es zweier Hohlspiegel bedarf, deren Herstellung bei der großen

Fig. 58.



Genauigkeit, mit der sie geschliffen sein müssen, sehr mühsam ist. Beide Fernrohre aber leiden in gleicher Weise an dem Mangel, daß die das Bild entwerfenden Strahlen zweimal reflektiert werden und dadurch eine bedeutende Einbuße an Licht erleiden. Als daher im Anfang der vierziger Jahre dieses Jahrhunderts Graf Rosse*) beabsichtigte ein Fernrohr von einer Größe und Lichtstärke zu bauen, welches alles bisher Geleistete übertreffen sollte, suchte er diese doppelte Spiegelung zu vermeiden und dies gelang ihm leicht, indem er den großen Hohlspiegel gegen die Rohrachse

*) William Parsons, Graf von R., bis 1841 Lord Oxmantown, geb. 1800 in Irland, seit 1845 Peer von England. Er starb 1867.

Fig. 22.

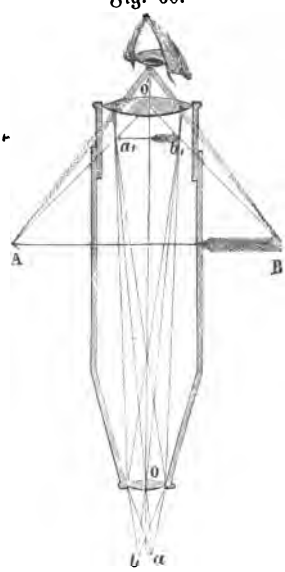
neigte und das Bild des Gegenstandes vor dem seitwärts am Rohre angebrachten Okular entwerfen ließ. Fig 59 zeigt das Gebäude und die weiteren komplicierten Einrichtungen, welche die Aufstellung dieses Rohres — seine Länge beträgt über 17 m bei 1,83 m Durchmesser und einem Gewichte des Spiegels von 4000 Kg — im Parke von Parsonstown erforderte. Bei solchen Dimensionen fällt die geringe Lichtmenge, welche durch den Kopf des Beobachters vom Spiegel abgehalten wird, ganz und gar nicht ins Gewicht. Indessen hat dies kolossale Instrument den von ihm gehegten Erwartungen keineswegs entsprochen. Den Entdeckungen Herschels hat es wenig oder gar nichts zugefügt. Und so verdanken wir die neueste unerwartete Entdeckung der kleinsten uns bis jetzt bekannten planetarischen Objekte, diejenige der Marsmonde, nicht ihm, sondern einem Keplerschen Fernrohre, welches hierzu in gleicher Weise durch die vortrefflichen, neuerdings in Amerika hergestellten Objektive, als auch durch die unvergleichliche Klarheit der Luft über den höheren Beobachtungspunkten Nordamerikas befähigt war.

Während so das Fernrohr unsere Kenntnis vom Makrokosmus bis zu einer Grenze förderte, über die hinaus zu gehen uns zunächst versagt zu sein scheint, so leistete das Mikroskop dasselbe für die Erforschung des Mikrokosmus. Auch diese dürfte an einer Etappe angekommen sein, von der nur neu zu findende Bahnen weiter führen können. Das Mikroskop ist in vieler Hinsicht ein umgekehrtes astronomisches Fernrohr zu nennen. Liegt bei diesem der Gegenstand in großer Entfernung und entwirft ein sehr stark verkleinertes Bild im Brennpunkte des Objektivs, so ist er bei jenem dem Objektiv sehr nahe und entwirft ein umgekehrtes reelles Bild in verhältnismäßig großer Entfernung von demselben. Beide Instrumente haben dann mit einander gemein, daß das vom Objektiv entworfene Bild mit dem als Lupe dienenden Okular betrachtet wird. Der Gang der Lichtstrahlen im Mikroskop kommt in der That mit dem des astronomischen Fernrohres überein, wenn man die erwähnten

Unterschiede im Auge behält. Er erhellt aus Fig. 60, wo ab das Objekt, O das Objektiv, O^1 das Okular, $a_1 b_1$ das von diesem entworfene reelle, AB das von jenem hervorgerufene virtuelle Bild vorstellt.

Die überraschenden Entdeckungen, die man kurz nach Erfindung des Fernrohres mit diesem Instrumente machte, mögen wohl der Grund gewesen sein, warum das Mikroskop nach seiner Erfindung zunächst unbeachtet blieb. Ausgehend von Spielereien mit Apparaten, welche aus einer Lupe mit davor befestigten Objekten bestanden, mußte man das Mikroskop eigentlich noch einmal erfinden, ehe man es zu wissenschaftlichen Untersuchungen verwenden lernte. Dies neue Instrument war aber nicht das eben beschriebene zusammengesetzte Mikroskop, sondern das einfache, welches aus nur einer, fast kugelförmigen Linse bestand. Man erhielt solche Linsen am einfachsten, indem man ein Glaströpfchen in eine kleine Öffnung fallen ließ, welche in einem Stück Blech ausgeschlagen worden war. Die Vergrößerung solcher Linsen, deren Ausdehnung die eines Stecknadelkopfes nicht übertrifft, ist allerdings sehr bedeutend, aber ebenso groß ist ihre sphärische Aberration. Außerdem ist das Beobachten mit ihnen unbeschreiblich mühsam, weil Linse und Objekt dem Auge äußerst nahe gebracht werden müssen. Trotzdem sind die großartigen Entdeckungen Leeuwenhoeks*) und Swammerdams**) mit ihnen

Fig. 60.



*) Antoni van L., geb. 1632 in Delft, war erst Handlungsdiener in Amsterdam, dann Privatmann in Delft, wo er 1723 starb.

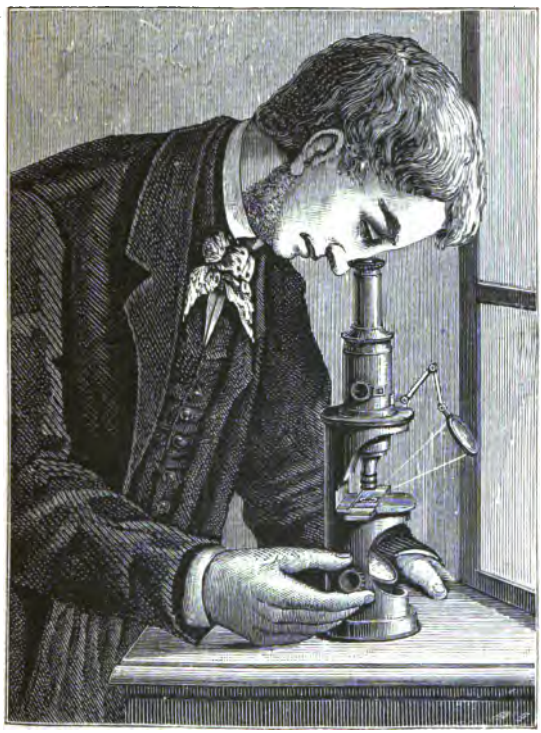
**) Joh. Sw., geb. 1637 in Amsterdam, lebte als Privatmann mit kurzen Unterbrechungen in Leiden und Amsterdam, wo er 1680 starb.

gemacht und es dauerte lange, bis man sich, an die Unbequemlichkeiten einmal gewöhnt, des zusammengesetzten Mikroskops wieder erinnerte. Auch bei ihm sind freilich die Wirkungen der sphärischen Aberration, sowie die bereits erwähnten Farbenränder, welche die Linsen geben, höchst störend, aber man hat doch wenigstens die Möglichkeit, sie wegzubringen, namentlich vermeidet man die erstere, indem man das Objektiv aus drei Linsen zusammensetzt. Seitdem man diesen Verbesserungen andere zugefügt hat, die ein höchst genaues Einstellen des Objektivs auf das Objekt ermöglichen, ist die Anwendung des zusammengesetzten Mikroskops eine so allgemeine geworden, daß ganze Teile der Physiologie und Anatomie, aber auch der Mineralogie ganz auf seine Anwendung basiert sind, und auch die Chemie kann seiner nicht mehr entbehren.

Bei der Anwendung des Mikroskops ist nun eine so große Menge von Einzelheiten zu berücksichtigen, daß das Mikroskopieren eine Kunst für sich geworden ist. Eine Menge von Manipulationen muß erlernt werden, wenn man durch das Instrument sehen und das Gesehene richtig deuten will. Zunächst müssen die Objekte genügend stark beleuchtet werden, da ja eine starke Vergrößerung die Stärke der Beleuchtung der einzelnen Teile eines Bildes sehr beeinträchtigt. Hat man es, wie in den meisten Fällen, mit transparenten Gegenständen zu thun, so giebt man ihnen genügende Helligkeit, indem man mittelst eines kleinen unter ihnen angebrachten Hohlspiegels konzentriertes Tageslicht oder, wenn nötig, auch direktes Sonnenlicht auf sie wirft. Sind aber die Gegenstände undurchsichtig, so muß man sie von oben durch eine Linse beleuchten, dabei allerdings auf starke Vergrößerungen verzichten. Fig. 61 zeigt die gewöhnliche Form des Mikroskopes mit Beleuchtungs-Spiegel und Linse, wie es vor einem Fenster aufgestellt werden muß. Der Beobachter hält den Knopf in der Hand, mittelst dessen er dem Beleuchtungsspiegel die richtige Stellung giebt. Wenn nun auch die Handhabung dieser Beleuchtungsapparate bequem und leicht ist, so ist die Herstellung der Objekte um so mühseliger. Damit sie durchsichtig

werden, muß man sie in die feinsten Lamellen zerschneiden und hierzu sind weiche organische Körper erst genügend zu erhärten, oder man muß sie, wie die Mineralien, zu ganz dünnen Plättchen schleifen. Ebenso oft ist nötig, feine Zwischenräume, die sonst Luft enthalten, mit einer gefärbten Flüssigkeit, meist Karmin-

Fig. 61.



lösung, auszufüllen u. dgl. m. Auch die Darstellung des Beobachteten bietet eigentümliche Schwierigkeiten. Zwar ist man jetzt imstande, auch die vom Mikroskop gelieferten Bilder mit großer Deutlichkeit zu photographieren; aber nur in verhältnismäßig seltenen Fällen kann sich der Beobachter dieses bequemen

Mittels bedienen. Am einfachsten legt man neben das Mikroskop ein Papier und sieht dann, indem man beide Augen offen hält, vermöge der identischen Netzhautstellen das mikroskopische Bild auf dem Papier und man kann es mit einiger Übung dahin bringen, das Bild auf das Papier durch Zeichnung zu übertragen.

Man fand nun, daß bei den stärksten Vergrößerungen alle Objekte eine Schraffierung nach doppelter Richtung zeigen. Diese sonderbare Erscheinung wußte man lange nicht zu erklären; denn daran, daß die kleinsten Teilchen aller Körper, welche durch die stärksten Vergrößerungen sichtbar würden, genau dieselbe Struktur haben sollten, war doch nicht zu denken. Wir wissen jetzt indessen, daß die Erscheinung nicht in der Natur der Körperteilchen, sondern in der des Lichtes begründet ist und daß eben durch diese Thatsache der Beweis geliefert wird, daß die jetzt bereits erreichten Vergrößerungen die stärksten sind, welche überhaupt noch Neues in Bezug auf Gestalt, Farbe ꝛc. jener Körperteilchen oder selbständigen Körperchen uns beobachten lassen.

Das Licht als Wellenbewegung.

Indem wir nunmehr dazu übergehen, uns über die Natur des Lichtes klar zu werden, betreten wir ein Feld der schwierigsten Untersuchungen. Es würde ein aussichtsloses Bemühen sein, sich auf demselben zu orientieren, wenn wir nur aus dem bisher Vorgetragenen unsere Schlüsse ziehen wollten. Denn bisher haben wir das Licht nur auf seinen Wegen an der Erdoberfläche verfolgt. Das für uns wichtigste Licht, das der Sonne, kommt aber zu uns, nachdem es ungeheure Räume durchlaufen hat, in die unser heimischer Planet nie gelangt. Gerade darin unterscheidet es sich aber von allen irdischen Körpern und die Fähigkeit, solche Bahnen zu wandeln, wird vor allen Dingen berücksichtigt werden müssen, wenn wir die Frage beantworten wollen, was Licht sei. Dazu kommt, daß im Gegensatz zu allen irdischen Vorgängen, das Licht gar keine Zeit nötig zu haben scheint, um solche Wege zu durcheilen. Wenigstens hatten die Versuche, welche Galileis Schüler auf

Chriſtiaan Huygens.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

einen Vorschlag ihres Meisters hin anstellten, auch nicht die geringste Zeit beobachten lassen, die das Licht brauchte, um von einem Orte der Erde zu einem andern zu gelangen, und so nur die bereits von Descartes*) bestimmt ausgesprochene Ansicht, daß die Ausbreitung des Lichtes momentan erfolge, zu bestätigen geglaubt. Von einer Geschwindigkeit des Lichtes, also von einem angebbaren Wege, den es in der Zeiteinheit, beispielsweise der Sekunde, zurücklegte, schien nicht geredet werden zu können.

Aber diese Ansicht sollte von einer Seite einen vollständigen Umsturz erfahren, von der man einen solchen durchaus nicht hatte erwarten können. Der dänische Astronom Römer**) hatte 1672 Beobachtungen der Jupitertrabanten begonnen, welche erst 1676 ihren Abschluß fanden und deren Zweck die Ermittelung der Umlaufszeit derselben um ihren Centralstern war. Er bestimmte zu diesem Zweck die aufeinander folgenden Verfinsterungen des hellsten der genannten Trabanten, welche wegen der Größe Jupiters bei jedem seiner Umläufe eintreten. Statt daß sich nun aber hieraus, wie man erwarten mußte, eine unveränderliche Umlaufszeit ergab, so fand Römer dieselbe vielmehr im Laufe eines Jahres erst länger und dann kürzer werden, sie schien also von der Bewegung der Erde abzuhängen. Aber daran konnte man doch im Ernste nicht denken und die Sache erklärte sich bei genauerer Betrachtung einfach genug. Es ergab sich nämlich, daß die Umlaufszeiten jedesmal dann kürzer schienen, wenn die Erde sich nach dem Jupiter hin, und länger, wenn sie sich von ihm weg bewegte. Daraus zog Römer nun den Schluß, daß die Ursache der merkwürdigen Erscheinung die Bewegung der Erde

*) René D. (Renatus Carteſius), geb. 1596 in La Haye (Touraine), ließ sich nach mancherlei Kriegsfahrten uud sonstigen Reisen in Holland nieder, ging 1649 nach Stockholm, wo er 1650 starb.

**) Olaf R., geb. 1644 in Aarhuus, war von 1671—81 Lehrer des Dauphins in Paris und Mitglied der dortigen Akademie, wurde später Prof. in Kopenhagen, dann Polizeiminister und Justizrat, endlich Staatsrat und starb daselbst 1710.

sei, so daß bei ihrer Annäherung an Jupiter man die Verfinsterung früher sähe, bei der Entfernung später, als man sie bei stillstehender Erde gesehen haben würde. Diese Schlußfolgerung gründete sich aber auf die Voraussetzung daß das Licht Zeit brauche, um den Weg vom Jupiter bis zu uns zurückzulegen, und Römers Scharfsinne blieb auch keineswegs verborgen, daß seine Entdeckung geeignet war, die Geschwindigkeit des Lichtes zu bestimmen. Er fand, daß die Verzögerung, die der Eintritt jener Verfinsterungen während des halben Jahres zeigte, in welchem die Erde aus ihrer größten Jupitersnähe in die größte Jupitersferne gelangte, 986,38 Sek. betrug. Diese Zeit, so schloß er weiter, müsse das Licht brauchen, um den Durchmesser der Erdbahn, nämlich 41 364 648 geogr. M. zu durchlaufen, so daß es also in 1 Sek. 41 936 geogr. M. zurücklegen müsse.

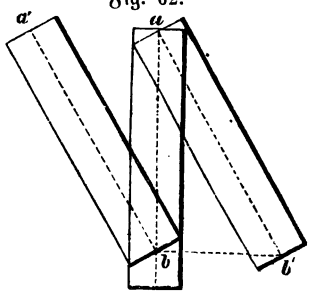
Fast 42 000 Meilen in 1 Sek., das war eine Zahl, die denn doch das Mögliche zu überschreiten schien, und wenn auch die Schlußfolgerung Römers keines Irrtums zu zeihen war, so schien doch eine anderweitige Bestätigung dieses gar zu unglaublichen Ergebnisses dringend notwendig. Auch diese brachte die Astronomie, und zwar durch Fixsternbeobachtungen, welche etwa 30 Jahre später Bradley*) anstellte behufs Aufstellung einer genauen Himmelskarte. Dabei fand er, daß die Fixsterne diesen Namen gänzlich mit Unrecht zu tragen schienen, denn alle beschrieben kleine Kreise oder Ellipsen, je nachdem sie senkrecht über der Ebene der Erdbahn standen, oder nicht, und was das sonderbarste war, alle in einem Jahre. Auch erschienen die Durchmesser dieser Bahnen sämtlich unter dem nämlichen sehr kleinen Gesichtswinkel und die Bewegungen erfolgten in demselben Sinne. Bedachte man nun, wie verschieden die Entfernung dieser Sterne von der Erde war, und welche Schwierigkeiten die Annahme bot, sie Bewegungen ausführen zu lassen, die von der Erde aus ge-

*) James Br., geb. 1692 zu Shireborn, war erst Pfarrer, wurde 1721 Prof. der Astronomie zu Oxford, 1742 königl. Astronom zu Greenwich, wo er 1762 starb.

sehen, so ganz konform erschienen, so konnte man keinen Augenblick daran zweifeln, daß die Bewegung der Erde an jenem Phänomen, welches den Namen der Aberration der Fixsterne erhielt, schuld sein müsse, und es gelang Bradley denn auch, die Erscheinung auf die Geschwindigkeit des Lichtes zurückzuführen.

Um seine Erklärung verständlich zu machen, diene zunächst folgende Betrachtung. Man denke sich, während Regentropfen in senkrechter Richtung vom Himmel herabfallen, ein cylindrisches Rohr a b, Fig. 62, vertikal aufgestellt. Ein in die Achse dieses Rohres bei a eintretender Tropfen wird dann längs derselben herabfallen und unterhalb b wieder austreten. Wird dagegen das Rohr in horizontaler Richtung rasch genug bewegt, so wird der Tropfen nicht durch das Rohr herabfallen können, sondern vorher von der Wand aufgefangen werden und zwar an einem um so höheren Punkte, je rascher das Rohr bewegt wird. Soll auch dann der Tropfen durch die Achse des Rohres gehen, so muß dasselbe geneigt werden und zwar so viel, daß sich der Punkt b' bis b bewegt, während der fallende Tropfen den Weg ab zurücklegt. Dann aber wird es auf einem bei b angebrachten Boden den Anschein haben, als käme der Tropfen von a', nicht, wie er es doch wirklich thut, von a.

Fig. 62.



In dem Falle, des Bodens des Rohres befindet sich nun die Netzhaut eines Beobachters, auf welche durch ein Fernrohr ein Lichtstrahl gelangt. Da sich die Erde mit einer Geschwindigkeit von 4,15 Meilen in der Sekunde in ihrer Bahn fortbewegt, so würden Lichtstrahlen, welche von einem Stern in die Achse des Fernrohrs eintreten, an die Wand desselben anschlagen, wenn es gerade auf den Stern gerichtet würde. Sollen sie dagegen die Achse durchlaufen, der Stern also mitten im

Fernrohr erscheinen, so muß dieses ein wenig in der Richtung geneigt werden, in welcher sich die Erde bewegt, ausgenommen, wenn ihre Bewegung gerade auf den Stern zu oder von ihm weg gerichtet ist. Nun ist die Bahn der Erde eine geschlossene krumme Linie. Nach einem halben Jahre muß also die Neigung des Rohres eine der früheren entgegengesetzte werden, wie man sich leicht an dem Beispiele der Regentropfen klar macht, wenn man sich mit einem schief nach oben geneigten Rohre in einem Wagen sitzend denkt, welcher so im Kreise herumfährt, daß sein Vorderteil stets nach derselben Richtung hinweist. Die Fixsterne müssen somit am Himmel Bahnen zu beschreiben scheinen, die die Form haben, unter der die Erdbahn von ihnen aus gesehen würde. Die Annahme, daß das Licht Zeit braucht, um von einem Fixsterne zu uns gelangen, würde also genau die Erscheinungen fordern, die Bradley beobachtete. Hatte er nun einen Stern an einem Abend in die Mitte des Gesichtsfeldes des Fernrohrs gebracht und wiederholte dieses sodann nach Ablauf eines halben Jahres, so mußte er das Fernrohr um einen Winkel von 40,5 Sekunden verstellen, wenn er ihn wieder in der Mitte des Gesichtsfeldes sehen wollte. Hieraus berechnet sich die Geschwindigkeit des Fixsternlichtes zu 41 500 geogr. Meilen.

In erst später auseinanderzusetzender Weise haben französische Forscher in unserem Jahrhundert auch die Geschwindigkeit des Lichtes irdischer Lichtquellen gemessen und dafür Zahlen erhalten, die mit genügender Genauigkeit mit denen von Römer und Bradley übereinstimmen. Aus ihren Beobachtungen ist als zuverlässigstes Resultat abgeleitet, daß das Licht in der Sekunde einen Weg von 40 200 Meilen oder 298 300 Kilometer zurücklegt.

Das Licht braucht somit Zeit, um von einem Orte zum andern zu gelangen, gerade wie die Körper es auch thun, nur daß diese Zeit viel kürzer ist, als wir sie bei der Bewegung der Körper zu beobachten pflegen, und daher bei so kurzen Entfernungen, wie sie auf der Erdoberfläche vorzukommen pflegen, ohne besondere Hilfsmittel nicht wahrgenommen werden kann.

Nachdem man aber dies Resultat erhalten hatte, durfte man hoffen, Ansichten über das Wesen des Lichtes fassen zu können, die dies rätselhafte Agens und seine Wirkungen besser erklären ließen, als es im Altertum möglich gewesen war.

Da das Licht stets von Körpern ausgeht, so stellt es immer eine Kommunikation zwischen dem gesehenen Gegenstande und dem Auge her, es sind somit die drei Annahmen möglich, entweder daß die Lichtstrahlen von dem Auge ausgehen und den Körper wie Tastorgane des Auges berühren, oder daß der Körper eine Fernwirkung irgend welcher Art auf das Auge ausübe, oder endlich daß beides zusammen stattfände und sich von dem Gegenstande ausgehende Strahlen mit vom Auge ausgesandten vermischten. Die erste und letzte Annahme finden sich bei den Schriftstellern des Altertums, daß sie unmöglich haltbar sind, hat Aristoteles*) bereits mit der einfachen Bemerkung dargethan, daß, ihre Richtigkeit vorausgesetzt, man im Dunkeln auch müsse sehen können. Die zweite Annahme bleibt also allein übrig, sie schließt wegen der geradlinigen Fortpflanzung die beiden Möglichkeiten in sich, entweder daß nach Analogie eines fliegenden Geschosses das Licht aus kleinen sehr rasch bewegten Teilchen bestehe, die von dem leuchtenden Körper unaufhörlich ausgesendet in das Auge eindrängen, oder daß nach Analogie der Wellenbewegung des Wassers eine ebensolche Bewegung unaufhörlich von dem leuchtenden Körper verursacht werde. Beide Annahmen sind gleichzeitig gemacht, die erstere von Newton, die zweite von Huygens,**) und unter dem Namen der Emissions- oder Emanationstheorie und der Undulationstheorie bekannt geworden. Wir werden nunmehr zu prüfen haben, welcher derselben die größere Berechtigung zukommt.

*) Geboren 384 v. Chr. zu Stagira, war Arzt und Philosoph zu Athen, wo er die peripatetische Schule stiftete. Er starb 322 v. Ch. in Chalcis auf Euböa.

**) Christiaan H. van Zuylichem, geb. 1629 im Haag, lebte nach vielfachen Reisen von 1666 bis 1681 als Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Paris, von da bis zu seinem 1695 erfolgten Tode als Privatmann im Haag.

Dazu werden wir die Konsequenzen beider ziehen und zusehen müssen, ob dieselben mit den beobachteten Thatsachen übereinstimmen. So lange die von uns gemachten Erfahrungen sich durch beide gleich gut erklären lassen, werden wir uns weder für die eine, noch für die andere entscheiden können. Aber wir dürfen hoffen, endlich an einem Punkte anzulangen, wo diese Gleichberechtigung aufhört, weil die eine Annahme in Widerspruch gerät mit den Resultaten unserer Experimente.

Zunächst fordern beide Theorieen die Annahme, daß es einen leeren Raum im eigentlichen Sinne des Wortes überhaupt nicht giebt. Da das Licht immer imstande ist denselben zu durchlaufen, so muß er nach der Emissionstheorie mit den fliegenden kleinen Teilchen, nach der Undulationstheorie mit dem Substrat der Wellenbewegung angefüllt sein. Da ferner das Licht imstande ist seinen Weg durch die durchsichtigen Körper zu nehmen, so muß das von beiden Theorieen geforderte Substrat dieselben durchdringen. Daraus folgt aber, daß es von einer Feinheit sein muß, welche diejenige des Stoffes, der die Körper zusammensetzt, weit übertrifft, und für einen Stoff im gewöhnlichen Sinne des Wortes werden wir dieses Substrat mithin nicht erklären dürfen. Man hat deshalb dafür die Bezeichnung eines Mediums oder Mittels eingeführt und nennt weiter dasjenige Mittel, welches wir als Träger der Lichtbewegung voraussetzen, den Lichtäther oder schlechthin den Äther. Wie die Körper muß nun aber der Äther aus einzelnen Atomen bestehen. Diese Annahme macht Newtons Hypothese direkt, aber auch die Huygens'sche kann sich ihr nicht entziehen, was sogleich klar werden wird, wenn wir uns eine Vorstellung von der Wellenbewegung des Äthers zu machen versuchen.

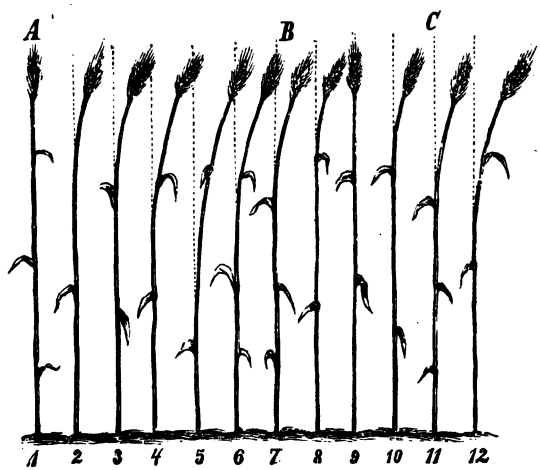
Sehen wir uns zu diesem Zwecke zunächst nach den Bedingungen um, unter denen andere Wellenbewegungen zustande kommen. Jedem, der von einem genügend hohen Standpunkt einmal ein Regiment Soldaten durch eine lange Straße nach dem Takte der voranschreitenden Musik marschieren sah, muß die

eigentümliche Bewegung aufgefallen sein, die fortwährend das Regiment in einer Richtung zu durcheilen scheint, welche derjenigen entgegengesetzt ist, in der die Mannschaften marschieren. Tragen dieselben Helme, so scheinen deren leuchtende Spitzen nicht eine dem Straßenpflaster parallele Ebene, sondern statt dessen eine Fläche zu bilden, die aus fortschreitenden Erhöhungen mit folgenden Vertiefungen besteht. Jeder Soldat tritt nämlich beim guten Taktteil des ertönenden Marsches an, erhebt aber beim Vorschreiten den Kopf über den stehenbleibenden Fuß, während der andere Fuß gleichzeitig nach vorn schwingt. Der Kopf senkt sich aber wieder, während der Körper über den vorgesetzten Fuß gehoben wird, und so geht mit dem Schreiten ein abwechselndes Senken und Heben des Kopfes parallel. Nun hören die weiter hinten marschierenden die Musik etwas später als die weiter vorn schreitenden, die folgenden Reihen treten also immer etwas später an als die vorangehenden und erheben demgemäß den Kopf mit dem Helm etwas später. Infolge davon glauben wir eine Wellenbewegung durch das Regiment hineilen zu sehen. Indem der Beobachter nun dem Regimente mit den Augen folgt, sieht er von der fortschreitenden Bewegung desselben ab, er beobachtet nur die Hebung und Senkung der Helme. Diese periodisch wiederkehrende Bewegung der einzelnen, die das Regiment zusammensetzen, welche jedoch so erfolgt, daß der folgende sie immer etwas später beginnt als der vorhergehende, genügt also, eine Wellenbewegung hervorzurufen. Die auf- und abgehende Bewegung der Helme geht dabei senkrecht zu der Richtung, in der die Welle das Regiment durchläuft, vor sich, eine solche Wellenbewegung heißt aber eine transversale.

Eine andere Art der Wellenbewegung, eine longitudinale, in welcher die wiederkehrende Bewegung der Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung der Welle erfolgt, ist jedermann bekannt, der einmal über hoch im Halme stehende Kornfelder, die ein leiser Wind bewegt, auf einander folgende helle und dunkle Streifen langsam hat hinziehen sehen. Der Wind treibt nämlich

die einzelnen Halme des Feldes zu einer langsam schwingenden Bewegung an, die sie aber, wie sie vom Winde gefaßt werden, nacheinander ausführen. Fig. 63 stellt eine Reihe solcher Halme dar, von denen 1 und 9 gerade eine Schwingung beendigt haben und somit eine neue beginnen. Die gleichzeitige Lage der dazwischen liegenden Halme ist aus der Figur ersichtlich und man sieht, wie die Ähren bei A und C dünner, bei B dichter zu liegen kommen, wenn die geringe Vertiefung bei B außer Acht

Fig. 63.



gelassen wird. Bei B erscheint das Feld dann dunkler, bei A und C lichter, und da die Halme, welche in Linien liegen, die senkrecht zu der gezeichneten Halmreihe stehen, sich in gleicher Lage befinden, so erklären sich leicht die in einem bestimmten Augenblick sichtbaren Streifen. Nach kurzer Zeit neigen sich nun aber 1 und 9 wieder, während 2 und 10 aufrecht stehen, überhaupt alle Halme die Stellung haben, die in dem durch die Figur dargestellten Momente die links neben ihnen befindlichen

Halme zeigen. So geht dies fort, und es ist somit klar, daß die dunklen Streifen langsam über das Feld hinziehen müssen. Auch diese Bewegung wird also nur dadurch möglich, daß einzelne Teilchen vorhanden sind, die nach einander dieselbe schwingende Bewegung ausführen. Analoge Betrachtungen ergeben dieselben Grundbedingungen für eine jede Wellenbewegung, und so ist mithin auch die Undulationstheorie gezwungen, sich den Äther aus einzelnen Atomen bestehend zu denken, welche successive schwingende Bewegungen ausführen. Die Bewegungen selbst erfolgen aber, wie man annehmen muß, nach denselben Gesetzen, wie die Schwingungen eines Pendels.

So wünschenswert es nun gewesen wäre, das Dasein des Äthers aus der Bewegung der Himmelskörper zu beweisen, so haben doch die in dieser Richtung angestellten mannigfachen Versuche bis jetzt zu keinem Resultate geführt. Daraus ist aber ganz und gar kein Argument gegen die Voraussetzung des Äthers zu nehmen; ist doch, wie wir sehen werden, die Übereinstimmung der Resultate der Theorieen, die ihn voraussetzen, mit den Ergebnissen der Experimente eine so große, daß wir seine Existenz für so wohl begründet ansehen müssen, wie jede andere Hypothese der exakten Naturwissenschaft auch.

Da die Geschwindigkeit des Lichtes sich immer als die nämliche erwiesen hat, wo und wie man sie auch beobachtete, so muß man schließen, daß sich das von irgend einer Lichtquelle ausgehende Licht nach allen Seiten mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen muß. Zu derselben Zeit ausgesandte Lichtteilchen oder von der das Licht hervorrufenden Wellenbewegung gleichzeitig ergriffene Ätherteilchen müssen also stets in derselben Entfernung von der Lichtquelle sich befinden, das Licht muß sich in immer größer werdenden Kugeln ausbreiten, deren Mittelpunkt die Lichtquelle ist. Nach Newton muß dann die Anzahl der Teilchen auf der Flächeneinheit in demselben Verhältnisse abnehmen, in dem die Kugeloberflächen größer werden, da sie immer gleich verteilt auf denselben bleiben. Nach Huygens dagegen muß die

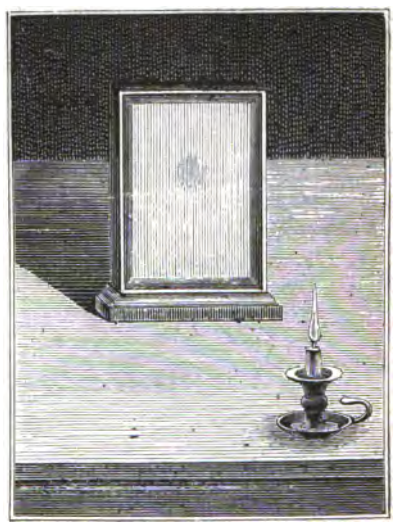
Anzahl der zu bewegenden Teilchen eine ebenso viel Mal größere werden, somit der Impuls, der ein einzelnes Teilchen in Bewegung setzt, ein ebenso viel Mal geringerer. Gelangt nun unter sonst gleichen Verhältnissen Licht in verschiedenen Entfernungen von der Lichtquelle in unser Auge, so werden die Nervenenden bei näherem Standpunkt durch mehr Lichtteilchen oder durch Ätherteilchen erregt, welche in stärkerer Bewegung begriffen sind, als bei entfernterem Standpunkte. Im ersten Falle werden sie also stärker gereizt, als im letzteren, die Lichtempfindung muß mithin eine intensivere werden. Die Lichtstärke oder Lichtintensität wird also nach der Anzahl der ankommenden Lichtteilchen oder nach der Stärke der schwingenden Bewegung der Ätherteilchen beurteilt werden müssen und demnach mit der Entfernung von der Lichtquelle abnehmen. Da sich nun nach mathematischen Gesetzen die Oberflächen zweier Kugeln wie die mit sich selbst multiplizierten Halbmesser verhalten, so muß die Lichtstärke in der vierfachen Entfernung die Hälfte, in der neunfachen ein Drittel u. s. w. der ursprünglichen sein. Ebenso werden, wenn ein Bündel Lichtstrahlen schief auf eine Fläche fällt, auf der Einheit derselben weniger Lichtteilchen anlangen oder daselbst mehr Ätherteilchen in Bewegung gesetzt werden müssen, als wenn das Bündel die Fläche in senkrechter Richtung trifft.

Das Gesetz der Abnahme der Lichtbewegung wird uns somit kein Mittel an die Hand geben, über die größere Berechtigung der Emissionstheorie oder der Undulationshypothese zu entscheiden. Immerhin aber ist es eine Aufgabe von großer Wichtigkeit, Lichtstärken mit einander zu vergleichen. Ist sie schon theoretisch von höchstem Interesse, so ist sie für den Beleuchtungstechniker von geradezu ausschlaggebender Bedeutung, denn nur mit Hilfe der Instrumente, welche bestimmt sind, sie zu lösen, der Photometer, ist er in der Lage über die größere oder geringere Güte von Beleuchtungsapparaten oder Beleuchtungsmaterial zu entscheiden.

Solcher Photometer sind nun eine große Menge konstruiert,

weitere Verbreitung hat aber wohl nur das von Bunſen*) gewonnen. Das Prinzip desſelben, welches die Fig. 64 und 65 zu erläutern beſtimmt ſind, iſt von großer Einfachheit. Beide ſtellen einen Papierſchirm vor, in deſſen Mitte ein Fettflecken angebracht iſt. Stellt man nun ein Licht vor demſelben auf und betrachtet die beleuchtete Seite, ſo erſcheint der Fleck dunkel auf hellem Grunde, Fig. 64, betrachtet man dagegen die unbeleuchtete Seite, Fig. 65, ſo erſcheint er hell auf dunkeln Grunde. Die Urſache dieſes verſchiedenen Verhaltens liegt darin, daß die fettige Stelle des Papiers transparenter iſt, wie die ſie umgebenden Teile desſelben, daß jene von dem auf ſie fallenden Lichte mehr durchläßt, wie dieſe. Dafür werfen die letzteren mehr Licht zurück. Im auffallenden Lichte müſſen ſie alſo heller, im durchfallenden dunkler erſcheinen, wie jene; ſtellt man zwei ungleich helle Lichter auf beiden Seiten auf, ſo muß der Fettflecken dunkel auf hellem Grunde von der Seite des ſchwächeren, hell auf dunklem Grunde von der Seite des ſtärkeren Lichtes geſehen werden. Wenn man dagegen die beiden Seiten gleich ſtark beleuchtet, ſo verſchwindet er, vorausgeſetzt, daß die Farbe der Lichter dieſelbe iſt. Da nun die Stärke der Beleuchtung im Verhältnis der mit ſich ſelbſt mult-

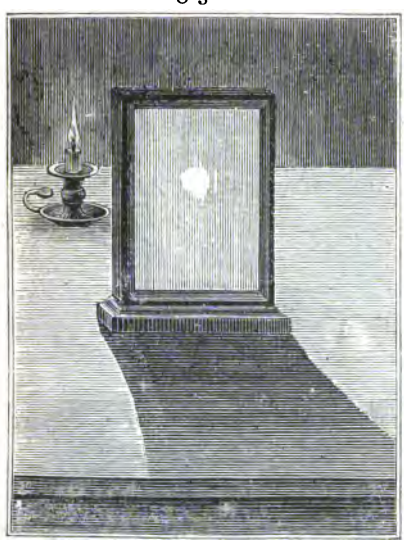
Fig. 64.



*) Robert Wilhelm B., geb. 1811 in Göttingen, war erſt Lehrer an der höheren Gewerbeſchule in Kaſſel, wurde 1838 Profeſſor in Marburg, 1851 in Breslau und iſt ſeit 1852 Profeſſor der Chemie in Heidelberg.

plicierten Entfernung der Lichtquelle vom Schirme abnimmt, so hat man nur das eine der Lichter so lange zu verschieben, bis der Fleck verschwindet, um die Abstände zu finden, in denen sie mit gleicher Lichtstärke wirken, und kann so die Lichtstärke beider Lichter vergleichen, aber man kann auch umgekehrt an eine Seite eins, an die andere zwei, drei und mehr Lichter derselben Qualität aufstellen, um so das Gesetz der Abnahme der Lichtstärke von der Lichtquelle zu prüfen. Um genauer bestimmen zu können, wann die Flecken verschwinden, stellt man zwei Spiegel so auf, daß man in ihnen die beiden verschiedenen Seiten des Schirmes nebeneinander sieht, und hat dann nur dafür zu sorgen, daß dieselben möglichst gleiche Helligkeit haben.

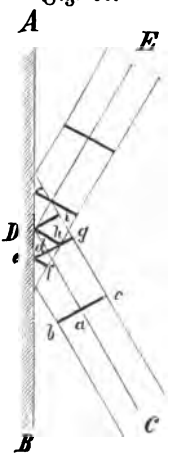
Fig. 65.



Wenn die bisherigen Betrachtungen keine Entscheidung über die beiden Lichttheorieen treffen ließen, so scheint dazu mehr Aussicht vorhanden zu sein, wenn, wie dies bei der Reflexion und Brechung der Fall ist, die Lichtteilchen oder die Lichtbewegung der Einwirkung der Körperatome ausgesetzt werden. Nach der Emissionstheorie erklärt sich die Reflexion ungemein leicht. Ebenso wie eine in die Mitte angestoßene Billardkugel unter demselben Winkel von der Bande zurückgeworfen wird, unter dem sie auftrifft, so auch die Lichtteilchen, welche auf die reflektierende Fläche treffen. Aber auch der Undulationstheorie macht diese Erklärung keine besondere Schwierigkeit. Da sie annehmen muß, daß ein jedes Teilchen von dem vorhergehenden veranlaßt wird, dieselbe schwingende Bewegung

wie dieſes, nur ein ganz klein wenig ſpäter auszuführen, ſo werden die in der Nähe der reflektierenden Fläche gelegenen Teilchen mit einer gewiſſen Geſchwindigkeit gegen die Wand fliegen und ebenſo wie die Billardkugel unter demſelben Winkel zurückgehen unter, dem ſie auftrafen. Für eine longitudinale Wellenbewegung iſt damit ſchon das Reflexionsgeſetz eben ſo erklärt, wie aus der Emiſſionshypotheſe, für die transverſalen Wellen ergiebt es ſich folgendermaßen. Es ſei, Fig. 66, AB die reflektierende Fläche, CD der auffallende, DE der reflektierte Strahl, bac die Bahn eines ſchwingenden Teilchen, was durch AB in ſeiner Bewegung noch nicht gehemmt wird, d ein ſolches Teilchen, welches, nachdem es die Bahn dgde beſchrieben, bei e anprallt und wie die Billardkugel nach f zurückgeſchleudert wird. Zurückgehend paſſiert ihm bei e dasſelbe und ebenſo den mehr nach D hingelegenen Teilchen. Da nun die Wirkung ſämtlicher Ätherteilchen auf ein in ihrer Mitte liegendes eine ſolche iſt, daß das Ätherteilchen nur in ſeiner urſprünglichen Lage zur Ruhe kommen kann, ſo muß es, nachdem es an das andere ſeine Bewegung übertragen hat, in ſeine urſprüngliche Lage zurückkehren, und da alle in der Nähe von D gelegenen Teilchen dasſelbe Verhalten zeigen, ſo müſſen ſie Veranlaſſung werden, daß der auffallende Strahl CD als reflektierter Strahl DE unter demſelben Winkel zurückgeht.

Fig. 66.



Bei der Brechung tritt das Licht in die Körper herein und hier werden wir eine mächtigere Einwirkung der Körperteilchen zu erwarten haben. Die Ausſicht wächſt alſo hier, endlich die gehoffte Entſcheidung treffen zu können. Es iſt von vornherein von Bedeutung, daß Newton die Brechung nicht anders erklären konnte, als unter Einführung einer neuen Annahme. Da jeder Strahl beim Auftreffen auf eine durchſichtige ſpiegelnde Fläche

in einen gebrochenen und in einen reflektierten zerlegt wird, so müssen die Lichtteilchen nach Newtons Ansicht verschiedene Anwandlungen besitzen. Haben sie beim Auftreffen die Anwandlung des Zurückprallens, so werden sie reflektiert, haben sie die des Eindringens, so werden sie gebrochen. Dazu muß aber der englische Gelehrte dem Mittel, auf das die Lichtteilchen auftreffen, zugleich anziehende und abstoßende Kräfte zuschreiben und kommt hier zu Konsequenzen, die schwer zu entfernende Widersprüche geben. Die Schwierigkeit wächst, sowie man zur Erklärung der Richtungsänderung des Strahles schreitet. Wird im optisch dichteren Mittel der Strahl nach dem Einfallslot hin gebrochen, so kann dies nur infolge der stärkeren Anziehung der Teilchen des Mittels auf die Lichtteilchen geschehen. Giebt man dies aber zu, so läßt sich auf mathematischem Wege leicht beweisen, daß dann die Geschwindigkeit im optisch dichteren Mittel größer sein muß als im optisch dünneren, gewiß ein Resultat, welches die schwersten Bedenken hervorruft.

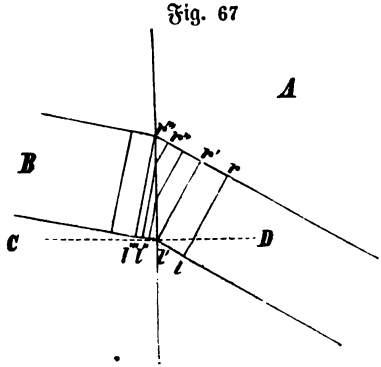
Die Undulationstheorie ergiebt das entgegengesetzte Resultat. Daß eine Wellenbewegung durch die Grenzfläche zweier Mittel hindurch gehen kann, ist eine alltägliche Erfahrung. Wer sollte nie die Erzitterungen gefühlt haben, die Wasserwellen, welche an den Rumpf eines Schiffes oder eine Bohlenwand am Ufer schlagen, in diesen Körpern hervorrufen und welche sich deutlich wie eine Wellenbewegung durch sie hin fortpflanzen, während zugleich die Welle im Wasser zurückgeht. Die Richtungsveränderung des Strahles aber erklärt sich leicht, wenn nach Doves*) Vorgang man folgendes Bild zu Grunde legt.

Anstatt der Lichtwelle stelle man sich eine Reihe von Reitern rl, Fig. 67, vor, die auf ganz gleich großen Pferden sitzen und über eine Wiese A nach einem frisch geackerten Feld B hin traben, auf dem die Pferde vermöge der unbequemen Gangart

*) Heinrich Wilhelm D., geb. 1803 in Liegnitz, war erst Professor in Königsberg, dann in Berlin, wo er 1879 starb.

gezwungen werden, Schritt zu gehen. Die Front wird streng eingehalten, bis der linke Flügel an der Feldgrenze ankommt. Er wird sich nun nur langsamer fortbewegen können, während der einzelne Reiter sich nach wie vor nach dem linken Flügelmann richtet. Während nun der rechte Flügel die Strecke r'r'' zurücklegt, rückt der linke nur um l'l'' vor, die Fronte schwenkt also, so daß ihre Richtung sich der Feldgrenze mehr nähert. Die Reihe erhält dadurch einen Knick, der erst der früheren geraden Linie wieder Platz macht, nachdem auch der rechte Flügel nach r''' gelangt ist. Dann aber ist die ganze Front verschoben und geht nun parallel l'''r''' weiter. Um dies Bild auf die Lichtwelle anzuwenden, hat man nur anstatt der Front die fortschreitende Welle, für die Wiese das optisch dünnere und für das Feld das optisch dichtere Mittel zu setzen, um ohne weiteres sowohl das Resultat, daß der Lichtstrahl in diesem Falle nach dem Einfallslote CD hingebrochen wird, zu erhalten, als auch das weitere, daß die Geschwindigkeit des Lichtes in dem optisch dichteren Mittel geringer ist als in dem optisch dünneren.

Fig. 67

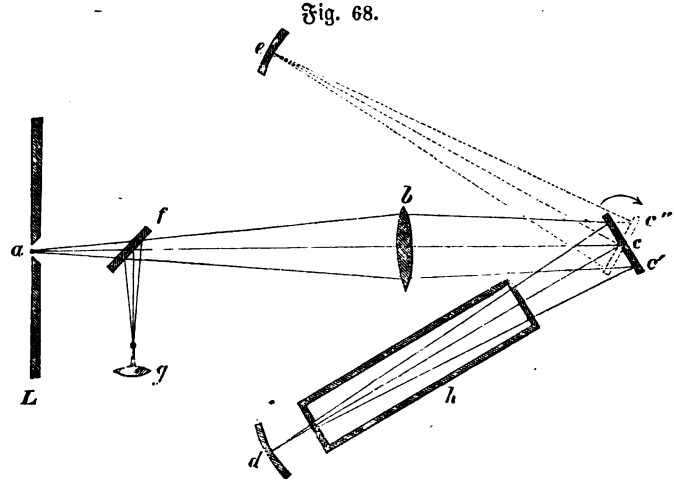


Arago*) gebührt das Verdienst, zuerst darauf hingewiesen zu haben, daß diese entgegengesetzten Postulate, zu denen beide Hypothesen führen, in bequemer Weise über sie zu entscheiden erlauben. Es bedarf eben nur der Untersuchung, ob das Licht

*) François A., geb. 1786 bei Perpignan, war erst Astronom des Längenbureaus und der Sternwarte, dann Professor an der polytechnischen Schule in Paris, 1831 Kammermitglied, 1848 Mitglied der provisorischen Regierung. Er starb 1853 in Paris.

in Wasser z. B. sich rascher oder langsamer als in Luft bewegt. Ihm selbst war es nicht vergönnt den Versuch anzustellen, da er erblindete. Dies holte später Foucault nach, welcher dazu den in Fig. 68 schematisch im Grundriß dargestellten Apparat anwendete. In die Öffnung a des Ladens, der das Beobachtungszimmer dunkel machte, war ein Draht lotrecht aufgespannt, während ein von der Sonne oder einer Lampe ausgehender Lichtstrahl ac, welcher durch einen Spiegel in horizontaler Richtung reflektiert wurde, durch sie hindurchging. Bei b fiel er auf eine

Fig. 68.



Linse und gelangte von hier weiter, auf einen kleinen Planspiegel c, welcher in sehr rasche Rotation um eine senkrechte Achse versetzt werden konnte. In der Stellung c' desselben wurde das Licht in dem Hohlspiegel d reflektiert, auf welchem die Linse ein Bild des Drahtes entwarf. In der Stellung c'' des Spiegels dagegen ging das Licht zu dem Hohlspiegel e und es wurde hier ebenfalls ein Bild des Drahtes entworfen. Das von diesen Spiegeln reflektierte Licht ging nun nach a zurück und entwarf hier abermals ein Bild des Drahtes. Zugleich aber wurde es von der

unbelegten Spiegelglasplatte nach g reflektiert und rief hier ein reelles Bild hervor, welches mittelst einer Lupe betrachtet werden konnte. Man konnte nun die Anzahl der Umdrehungen, die der Spiegel in der Sekunde machte, bestimmen. Erfolgte die Bewegung des Spiegels so rasch, daß während das Licht den Weg od hin und zurück machte, der Spiegel sich merklich gedreht hatte, so mußte das Bild von a etwas in der Richtung der Drehung verschoben werden, in der Lupe mehr nach rechts hin erscheinen. In hier nicht näher auseinanderzusetzender Weise läßt sich nun zunächst die Geschwindigkeit an der gemessenen Verschiebung dieses Bildes berechnen, so daß mit dem Apparate die oben erwähnte Messung der Geschwindigkeit des irdischen Lichtes möglich ist. Ebenso wie der Hohlspiegel d muß nun auch e wirken. Sind beide gleich weit von dem rotierenden Spiegel entfernt, so werden sie an derselben Stelle ein Bild von a entwerfen, man wird somit in der Lupe ein gegen seine Lage bei ruhendem Spiegel nach links verschobenes Bild des Drahtes erblicken. Der Umstand, daß das Bild während jeder Umdrehung von jedem Spiegel nur einmal während eines unmeßbar kurzen Augenblickes entworfen wird, ändert hieran nichts, da, wie wir sahen, jeder Lichteindruck im Auge eine gewisse Zeit braucht, um zu verschwinden, jeder Eindruck des Bildes des Drahtes also noch vorhanden ist, wenn der folgende bereits wieder eintritt. Dasselbe erscheint also nicht mit Unterbrechungen, sondern dauernd. Stellt man jedoch zwischen den Hohlspiegel d und den rotierenden Spiegel ein mit zwei Spiegelplatten verschlossenes Rohr, welches Wasser enthält, so muß nunmehr das Licht, das nach d und zurück geht, anstatt der Luft Wasser durchlaufen, während das von e reflektierte nur Luft zu durchlaufen hat. Bewegt sich das Licht durch das Wasser rascher, wie durch die Luft, so kommt der von d reflektierte Strahl früher zurück wie der von e zurückgeworfene, trifft also auf den rotierenden Spiegel, während derselbe sich erst um einen kleineren Winkel gedreht hat. Das dadurch hervorgerufene Bild des Drahtes muß also weniger

abgelenkt sein, und seine von beiden Spiegeln entworfenen Bilder werden nicht mehr auf-, sondern nebeneinander fallen. In der That sah Foucault den Draht doppelt, als das Wasserrohr vor den einen Spiegel gesetzt war. Er konnte leicht untersuchen, welches Bild dem einen und dem andern Spiegel gehörte, indem er dieselben abwechselnd verdeckte. Hatte die Emissionshypothese recht, so wurde das am wenigsten verschobene Bild von dem Licht, welches durch Wasser gegangen war, entworfen, im andern Falle wurden die Voraussetzungen der Undulationstheorie bestätigt. Foucault fand nun das Wasserbild, wie wir es kurz bezeichnen wollen, mehr verschoben als das Luftbild, die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser ist also kleiner als seine Geschwindigkeit in der Luft. Dies Resultat bedeutete mithin den Sieg der Undulationstheorie, es ergab den Satz, den der hiermit beendigte Abschnitt als Überschrift trägt, daß das Licht eine Wellenbewegung ist.

Das Licht als transversale Wellenbewegung.

Dadurch, daß wir das Licht als Wellenbewegung erkannt haben, haben wir aber noch nicht festgestellt, ob es eine transversale oder longitudinale Wellenbewegung ist. Es bleibt mithin nun noch zu untersuchen, wie die Ätherschwingungen vor sich gehen, ob in der Richtung des Strahles oder senkrecht auf dieselbe. Huygens hatte die erstere Annahme gemacht; aber er selbst hatte bereits eine optische Erscheinung, die der Doppelbrechung, untersucht und in mustergiltiger Weise geometrisch dargestellt, welche sich, was er auch durchaus nicht übersah, durch seine Annahme nicht erklären ließ. Indem nun hierzu noch das Gewicht des Newton'schen Namens kam, so war es begreiflich, daß Huygens' schöne Ideen nicht zur Geltung gelangten, und um so mehr, als die sie enthaltende Schrift erst nach seinem Tode der Öffentlichkeit übergeben wurde. Zwar hatten Newtons Nebenbuhler Hooke*) und

*) Robert H., geb. 1635 in Freshwater auf der Insel Wight, war Kurator der Experimente der Royal Society und Professor am Gresham College in London, wo er 1703 starb.

später Euler*) die Huygens'sche Theorie für annehmbar erklärt, aber sie hatten die ihr entgegenstehenden Schwierigkeiten nicht aus dem Wege geräumt, und so war alles beim Alten geblieben. Auch des gelehrten Young**) Stimme, der am Anfang dieses Jahrhunderts die Undulationstheorie dahin abänderte, daß er an Stelle der longitudinalen Bewegung Querschwingungen setzte, würde wohl ungehört verhallt sein, wenn nicht Malus***) im Jahre 1810 eine Entdeckung gemacht hätte, die zu erklären die Emissionstheorie außer stande war, während sie sich aus der Annahme, daß das Licht durch Querschwingungen des Äthers hervorgerufen wurde, ganz von selbst ergab. Malus bemerkte nämlich eines Abends, als er durch einen geschliffenen Krystall Sonnenlicht betrachtete, welches von den Fenstern der Tuilerien reflektiert wurde, mit großem Erstaunen, daß dasselbe abwechselnd verschwand und wieder auftrat, wenn er den Krystall vor seinem Auge um eine gewisse Achse drehte. Als Anhänger der Newton'schen Theorie glaubte er nun, daß er es mit einer Erscheinung zu thun habe, welche sich aus den Anwandlungen der Lichtteilchen erklären müsse, und daß namentlich einzelne Punkte der letzteren, die Pole, ein anderes Verhalten zeigten als alle anderen. Er nannte die Erscheinung deshalb Polarisation des Lichtes. Bei dem Aufsehen, welches seine Entdeckung erregte, gaben sich die Forscher alle Mühe eine Erklärung derselben zu finden. Eine solche gelang aber erst Fresnel, als er auf die Annahme Youngs von den Querschwingungen des Äthers zurückging. Dabei blieb dieser geniale Forscher jedoch nicht stehen. Durch Arbeiten, welche er in Gemeinschaft mit Arago

*) Leonhard Eu., geb. 1707 in Basel, ging 1727 nach St. Petersburg, wo er von 1730—41 Professor war, wurde dann Professor in Berlin, von wo er 1766 nach Petersburg zurückkehrte und hier 1783 starb.

**) Thomas Y., geb. 1773 in Milverton, lebte als praktischer Arzt in London, war 1801—4 Professor an der Royal Institution und starb 1829 in London.

***) Etienne Louis M., geb. 1775 in Paris, war Offizier im Dienste Napoleons I. und starb als Oberstlieutenant 1812 in seiner Geburtsstadt.

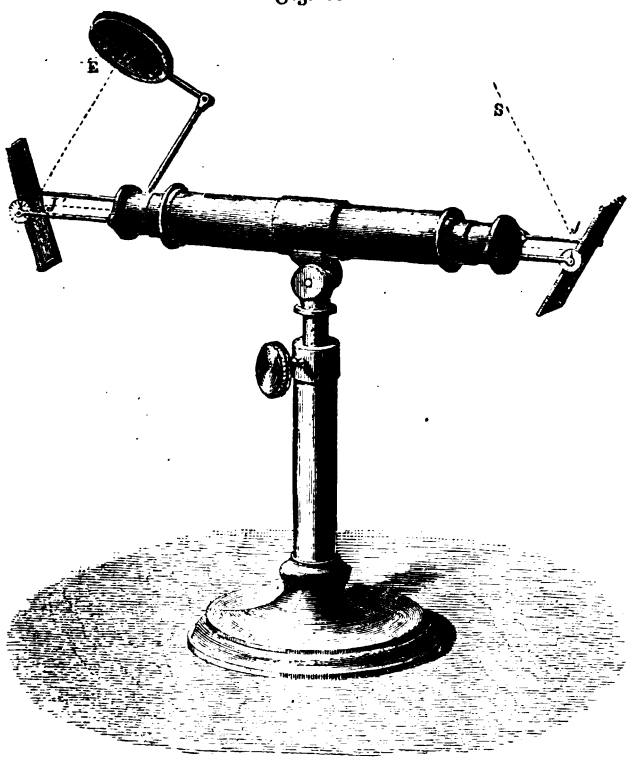
mit unglaublich primitiven experimentellen Hilfsmitteln machte, begründete er vielmehr die neue Lehre immer mehr, indem er zeigte, daß sich nicht nur alle damals bekannten Erscheinungen zwanglos aus ihr ableiten ließen, sondern daß sie auch Veranlassung geben konnte zur Auffindung einer Menge der merkwürdigsten neuen Experimente. Die letzte Hand aber legte Cauchy*) an die neue Theorie, indem er sie in einer Weise mathematisch durcharbeitete, daß sie fast angewandte Mathematik wurde. Das aber will nichts anderes sagen, als daß unsere Erkenntnis der optischen Gesetze und Erscheinungen eine nahezu vollständige geworden ist, und wenn auch noch einzelne Dunkelheiten, deren Aufhellung der Zukunft vorbehalten ist, hier und da zu Angriffen gegen die Wellenlehre des Lichtes geführt haben, so haben dieselben mehr Zeugnis für die mangelhaften Kenntnisse des Angreifers, als für die Unvollkommenheit der Lehre abgelegt.

Wenden wir uns nun dazu, die Erscheinungen, deren Erkenntnis zur Verwerfuug der Emissionstheorie und zur Annahme der Hypothese, daß das Licht eine transversale Wellenbewegung des Äthers sei, führte, genauer zu betrachten. Wir benutzen hierzu den Apparat, welchen Fig. 69 darstellt. Derselbe besteht aus einem offenen Rohr von Messing, vor dessen Öffnung zwei Spiegel von schwarzem Glase J und J' so aufgestellt sind, daß dieselben sich mit ihrem Gestelle um die Achse des Rohres, in ihrem Gestelle aber um Achsen drehen können, welche auf der Rohrachse senkrecht stehen. Stellt man nun beide Spiegel so, daß sie einander parallel sind und mit der Achse des Rohres einen Winkel von 35° bilden, was mit Hilfe geteilter Kreise, die auf den Spiegelachsen festsitzen, leicht möglich ist, und läßt dann ein Strahlenbündel SJ so auf J fallen, daß es in der Richtung der Achse des Rohres reflektiert wird, so beträgt der Reflexionswinkel desselben auf J und sein Einfallswinkel auf J' 55°. Unter diesem

*) Augustin Louis C., geb. 1789 in Paris, war Professor in Paris, nach der Juli-Revolution Erzieher des Herzogs von Bordeaux, kehrte später nach Paris zurück und starb 1857 in Sceaux.

Winkel wird das Strahlenbündel dann nach dem Auge bei E von J' reflektiert. Statt des Auges kann man unter Anwendung von direktem Sonnenlicht bei E auch einen Schirm aufstellen, auf welchem dann eine helle Stelle von der Form des Strahlen=

Fig. 69.



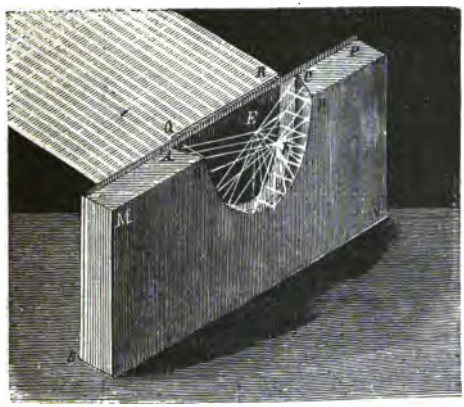
bündels entsteht. Dreht man alsdann den Spiegel J' um die Rohrachse, indem man den Schirm in entsprechender Weise mit herum bewegt, so nimmt die Helligkeit auf demselben mehr und mehr ab, bis sie bei einem Drehungswinkel von 90° verschwindet; dreht man weiter, so zeigt sie bei einem Drehungswinkel von

180° ihre frühere Helligkeit, bei 270° verschwindet sie wieder, bis mit der Drehung von 360° ihre anfängliche Helligkeit abermals erreicht wird. Denselben Wechsel von hell und dunkel beobachtet man, wenn man unter Anwendung von Tageslicht in den Spiegel blickt und diesen einmal um die Rohrachse dreht. Nimmt man anstatt des Spiegels J' ein Messingrohr, welches auf das Rohr des Apparates als Verlängerung aufgesetzt werden kann und eine Anzahl so übereinander geschichteter Spiegelglasplatten trägt, daß ihre Ebenen mit der Achse der Rohres einen Winkel von 35° bilden, so beobachtet man beim Drehen der Platten um diese Achse denselben Wechsel von hell und dunkel, nur daß die größte Dunkelheit jedesmal dann eintritt, wenn die Platten dem Spiegel J parallel stehen, die größte Helligkeit dagegen, wenn sie um 90° aus der parallelen Lage gedreht, also gegen den Spiegel gekreuzt sind. Es muß somit das unter dem Winkel von 55° von J reflektierte Licht in zwei senkrecht durch die Richtung des Strahles gelegten Ebenen verschiedene Eigenschaften erhalten haben, und diese Thatsache ist unter der Annahme von longitudinalen Schwingungen schlechterdings nicht zu erklären. Der Hypothese der Querschwingungen macht dagegen diese Erklärung keine Schwierigkeit, wenn man nur annimmt, daß die Schwingungen im polarisierten Strahle in einer einzigen, in dem unpolarisierten dagegen in rascher Aufeinanderfolge in allen möglichen Richtungen vor sich gehen. Die Schwingungen der einen Richtung werden dann leicht in das Glas des Spiegels eindringen können, die der andern nicht, und somit der in der einen Richtung polarisierte Strahl durchgelassen, der andere reflektiert werden.

Wie nun die Schwingungsebene im vollständig reflektierten und im vollständig durchgelassenen Strahle liegen muß, darüber haben uns die mannigfachen nach dieser Richtung hin bisher angestellten Versuche noch keinen sicheren Aufschluß geben können. Daß aber trotzdem die ausgesprochene Ansicht über den Unterschied des polarisierten und unpolarisierten Lichtes richtig ist,

bewies Dove, indem er auf experimentellem Wege zeigte, daß nach allen Richtungen polarisiertes und nicht polarisiertes Licht das nämliche ist. Seinen Apparat stellt Fig. 70 in perspektivischer Ansicht, aber so dar, als wäre er durch einen horizontalen Schnitt in zwei Hälften geteilt und die obere Hälfte weggenommen. Derselbe besteht aus einem hohlen Kegel ABCD, der in eine Glasplatte MN so ausgeschliffen ist, daß die Kegelfläche mit der nach BD gerichteten Seite der Platte einen Winkel von 35° bildet. Auf die andere Seite der Platte ist eine dünne Spiegelglasplatte OP aufgekittet, der mitten vor der

Fig. 70.



Öffnung des Ringes die Stanniolscheibe QR so aufgeklebt ist, daß ein schmaler Ring zwischen ihm und dem Rande AC der Platte MN übrig bleibt. Die durch denselben fallenden Strahlen eines auf MN geleiteten Bündels Sonnenlichts werden nun von ABCD so reflektiert, daß die vom vorderen Rande des abgestumpften Hohlkegels kommenden Strahlen nach E, die vom hinteren Rand kommenden nach F gelangen, die zwischen beiden auffallenden dagegen in die Linie EF. Auf dieser treffen also Strahlen zusammen, die nach allen Richtungen polarisiert sind; als aber Dove das Licht der Linie EF untersuchte, fand er, daß es nicht

OF THE

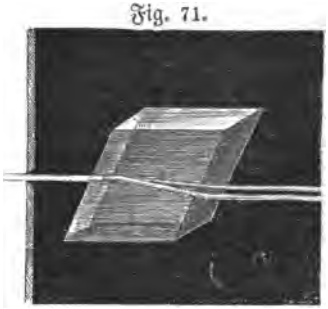
polarisiert war. Da somit die Annahme transversaler Schwingungen die sämtlichen vorgeführten Lichterscheinungen zu erklären, ja mathematisch darzustellen imstande ist, die Annahme longitudinaler Schwingungen aber die der Polarisation unerklärt lassen muß, so mußte die letztere fallen gelassen werden. Wir verfolgen indessen die Thatsachen der Polarisation noch etwas weiter, da sie zu einigen wichtigen Anwendungen Gelegenheit geben.

Ebenso wie das Glas sind alle Körper, welche das Licht reflektieren, auch befähigt, es zu polarisieren, nur ist der Winkel, unter dem das Licht alsdann auffallen muß, der Polarisationswinkel, ein anderer, der betreffenden Substanz eigentümlicher. Wird Licht nicht unter dem Polarisationswinkel reflektiert, so zeigt es zwar auch Polarisation, aber in viel geringerem Grade, es ist teilweise polarisiert. Da nun aber nur regelmäßig reflektiertes Licht polarisiert ist, so muß man umgekehrt schließen, daß polarisiertes Licht auch jedesmal regelmäßig reflektiert ist, also von einem nicht leuchtenden Körper ausgeht. Ein schwarzer Spiegel, auf den man Licht unter dem Polarisationswinkel auffallen läßt, würde geeignet sein zu untersuchen, ob dies polarisiert ist oder nicht. Im ersten Falle müßte ja das Licht, wenn man den Spiegel um den Strahl, der auf ihn fällt, als Achse drehen würde, abwechselnd verschwinden. Indessen ist die Anwendung eines solchen Spiegels als Polarisator so unbequem, daß es sich wohl der Mühe verlohnt, die Herstellung eines bequemeren, hierzu brauchbareren Apparates zu versuchen.

Dies erreicht man am leichtesten mit Hilfe von doppelt brechenden Krystallen. Die Eigenschaften, welche dieselben zeigen, beobachtet man am besten folgendermaßen: Man läßt auf ein Stück eines klaren Kalkspatkrystalles, welches man in einem verdunkelten Zimmer aufstellt, durch eine kleine Öffnung im Fensterladen mittelst des Heliostatenspiegels einen Sonnenstrahl fallen und bläst vor und hinter den Krystall Tabaksdampf. Da der Krystall im Innern nie vollständig durchsichtig ist, so kann man dann den Gang des Strahles innerhalb und außerhalb genau

verfolgen und sieht nun die Erscheinung, welche Fig. 71 zeigt. Im Krystalle zerlegt sich der einfallende Strahl in zwei, die gesondert aus dem Krystalle heraustreten und nebeneinander ihren Weg parallel dem einfallenden Strahl fortsetzen. Der Kalkspat hat demnach die Eigenschaft, einen Strahl gewöhnlichen Lichtes, der auf ihn fällt, in zwei zu zerlegen, welche verschieden stark gebrochen werden. Untersucht man nun diese beiden Strahlen mit dem polarisierenden Spiegel, so zeigen sie sich senkrecht zu einander polarisiert und es erhellt somit, daß er ein sehr bequemer Polarisator werden könnte, wenn es möglich wäre, den einen der beiden Strahlen wegzuschaffen.

Fig. 71.



Da nun auch andere Mineräle dieselbe Eigenschaft der Doppelbrechung zeigen, wie der Kalkspat, so hat man zunächst nach einem solchen gesucht, welcher den einen der beiden Strahlen in sich zurückhielt. Diese Eigenschaft hat der Turmalin, und in der That wird er namentlich bei mineralogischen Untersuchungen nicht selten zum Polarisieren des Lichtes angewendet. Aber er hat den Nachteil, daß er gefärbt ist und deshalb für viele Zwecke sich als unbrauchbar erweist. Unter diesen Umständen hat sich Nicol*) ein großes Verdienst erworben, indem er einen Weg angab, auf dem es möglich ist, den einen der beiden Strahlen im Kalkspat wegzuschaffen und so polarisiertes Licht dadurch herzustellen, daß man dasselbe durch das nach seinem Erfinder genannte Nicol'sche Prisma gehen läßt. Um dies zu erreichen, schliff Nicol die beiden kleinsten Flächen ac und bd (Fig. 72) des natürlichen Krystalles ein wenig ab, schnitt dann den Krystall längs der Ebene cd durch und kittete seine

*) William N., geb. um 1768, war Lehrer der Physik in Edinburgh, wo er 1851 starb.

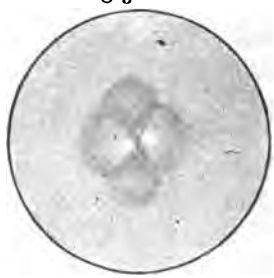
Hälften mit Kanadabalsam wieder aufeinander. Er bewirkte damit, daß infolge verschieden starker Brechung der eine Strahl von der Kanadabalsamschicht total reflektiert wurde, während der andere sie durchsetzte. Indem er nun das Prisma in ein innen geschwärztes Rohr setzte, erreichte er weiter, daß dieses reflektierte Licht auch vollständig verschluckt wird und so in das Auge, welches durch den Nicol (wie man das Instrumentchen auch kurz nennt) blickt, nur polarisiertes Licht gelangt.

Fig. 72.

Das Nicolsche Prisma ist deshalb geeignet, Licht darauf hin zu untersuchen, ob es polarisiert ist oder nicht. Das Planeten-, Kometen- oder Mondlicht erweist sich stets als teilweise polarisiert, also immer als wenigstens zum Teil regelmäßig reflektiert. Ebenso zeigt sich das Licht des Regenbogens im Gegensatze zu dem der Wolke, auf der er erscheint, stets polarisiert. Da nun eine Regenwolke, wie wir aus ihrem Verhalten zur Nachtzeit wissen, kein eigenes Licht ausstrahlt, so muß das von ihr ausgehende Licht zerstreut reflektiert sein, wie es vermöge der Zusammensetzung der Wolke aus einzelnen Tröpfchen ja auch nicht anders sein kann. Auch das Licht des hellen Himmels zeigt sich polarisiert, namentlich stark in einer Ebene, welche senkrecht zu einer zweiten Ebene gelegt wird, die durch das Auge, das Zenith des Beobachters und die Sonne geht. Somit muß das vom Himmel ausgestrahlte Licht reflektiertes Sonnenlicht sein. Da nun der Kreis am Himmel, in dem das Licht nicht polarisiert ist, mittelst des Nicol leicht gefunden werden kann, in diesem aber stets die Sonne steht, so kann man deren Lage auch bestimmen, wenn die Sonne bereits unter den Horizont ge-

sunken ist, der Himmel aber noch im Dämmerlicht leuchtet. Das giebt die Möglichkeit, auch alsdann noch nach der Sonne die Zeit zu finden, und diese liefert wiederum den Beweis, daß auch das Licht der Dämmerung reflektiertes Sonnenlicht ist. Da ferner das vom Wasser zurückgeworfene blendende Licht stets regelmäßig reflektiert, also auch polarisiert ist, so kann das Nicol'sche Prisma auch dazu dienen, unter Wasser befindliche Gegenstände sichtbar zu machen, wenn jenes zu helle reflektierte Licht das schwache, welches sie aussenden, überstrahlt. Man richtet nur ein entsprechend gehaltenes Nicol'sches Prisma gegen die Wasserfläche und jenes blendende Licht verschwindet. In einzelnen Fällen kann man das kleine polarisierende Instrumentchen auch benutzen, um interessante Punkte einer Fernsicht, welche von dem Lichte, das von den Staubteilchen in der Nähe des Horizontes ausgeht, überstrahlt werden, besser sichtbar zu machen, als sie es ohne Anwendung des Prisma sind.

Fig. 73.



Übrigens besitzt auch das unbewaffnete Auge die Fähigkeit polarisiertes Licht, welches von einer einfarbigen Fläche ausgeht, als solches zu erkennen. Es sieht nämlich in dem Augenblicke, wo es die Fläche anblickt, die in Fig. 73 dargestellte, unter dem Namen der Haidingerschen*) Büschel bekannte Figur. Die helleren Stellen zu beiden Seiten der in der Mitte eingeschnürten dunklen Region sind bläulich, jene ockergelb. Man kann die Büschel leicht wahrnehmen, wenn man durch einen Nicol auf einen gut beleuchteten Schirm von weißem Papier sieht und ihn hin und her dreht. Die Büschel haben eine bestimmte Lage gegen den Krystall und drehen sich also mit dem-

*) Wilhelm H., geb. 1795 in Wien, wurde 1840 nach vielfachen Reisen beim Bergwesen als Sektionsrat und Direktor der geologischen Reichsanstalt in Wien angestellt, wo er 1871 starb.

selben. Bei jeder Drehung aber erscheinen sie von neuem, ... hat man sie einmal gesehen, so erblickt man sie auch leicht an den Teilen des Abendhimmels, welche polarisiertes Licht ausstrahlen.

Farbenerscheinungen bei der Brechung des Lichtes.

Es wird dem Leser aufgefallen sein, daß wir trotz der großen Ausführlichkeit, mit der wir die wichtigsten Erscheinungen des Lichtes auseinandergesetzt haben, noch mit keinem Worte der Farbe Erwähnung thaten, die man doch sonst mit dem Lichte gewöhnlich in einem Atem zu nennen pflegt. In der That bedurfte es öfters besonderer Vorsicht, bei unsern Experimenten zu verhindern, daß auftretende Farbenerscheinungen die Resultate derselben nicht verwickelten. Jetzt nun, wo wir uns der Betrachtung dieser herrlichen Erscheinungen zuwenden, haben wir jene Versuche nicht viel abzuändern, um dabei mehr oder weniger in die Augen fallende Farben auftreten zu sehen.

Stellen wir zunächst den Versuch, den Fig. 16, S. 24 vorführt, so an, daß wir anstatt der Münze einen kleinen Porzellandeckel und anstatt des Glasgefäßes einen dunkelwandigen Eimer oder Zuber nehmen. Sehen wir nun in möglichst schiefer Richtung auf die Oberfläche des in das Gefäß gegossenen Wassers, so zeigt der Rand des gehoben erscheinenden Deckels an der dem Auge abgewendeten Seite einen zarten blauen, an der ihm zugewendeten einen gelbbraunen Rand, die beide nach und nach in Weiß übergehen. Die Brechung scheint somit neben ihren andern Wirkungen auch die zu haben, daß sie die genannten Farben hervorruft.

Ist dieses nun der Fall, so muß die farbenerzeugende Wirkung noch stärker hervortreten, wenn man den Lichtstrahl nach zweimaliger Brechung betrachtet. Am leichtesten erreicht man das, wenn man ihn durch zwei Flächen eines dreiseitigen Prismas aus Glas treten läßt. Ein durch ein solches betrachteter heller Gegenstand zeigt denn auch viel breitere und intensiver gefärbte Ränder als der eben besprochene Porzellandeckel. Noch besser freilich treten uns die betreffenden Erscheinungen

vor Augen, wenn wir nach dem Vorgange Newtons in einen Sonnenstrahl, welchen man in ein verdunkeltes Zimmer leitet, ein solches Prisma setzt und die Strahlen auf einem gegenüber aufgestellten Schirme auffängt, wie dies Fig. 74 zeigt. Die in

Fig. 74.

gerader Richtung von dem das Licht einlassenden Spalt zu dem Schirme gezogenen Linien geben den Verlauf an, welchen die Strahlen nehmen würden, wenn sie das Prisma nicht zu durchlaufen hätten. Sie würden auf dem Schirme ein kleines Sonnenbildchen entwerfen. Sowie aber das Prisma, eine Kante nach

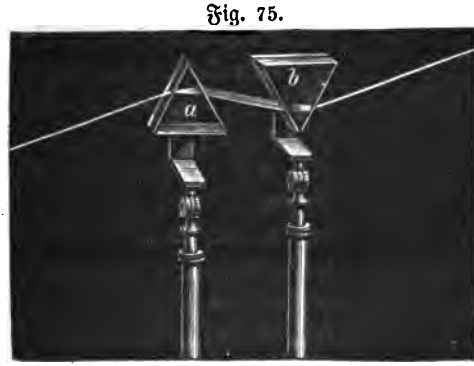
unten, in den Strahl gebracht ist, so entsteht viel weiter oben ein prachtvoll gefärbtes senkrechtes Lichtband, das Spektrum, das von unten nach oben die sogenannten Regenbogenfarben, nämlich rot, orange, gelb, grün, blau (hellblau), indigo (dunkelblau) und violett zeigt. Macht man nun die Strahlen durch Tabaksdampf sichtbar, so sieht man, daß sie an zwei Flächen des Prismas, die die sogenannte brechende Kante einschließen, nach dem Brechungsgesetz gebrochen werden, woher kommt aber die Verbreiterung, woher kommen die Farben?

Diese Fragen hat Newton durch eine mustergiltige Experimentaluntersuchung beantwortet und durch seine Arbeit die neuere Farbenlehre geschaffen. Ohne gerade die von ihm beliebte Reihenfolge seiner Untersuchungen einzuhalten, können wir auch jetzt noch nichts besseres thun, als seiner Spur zu folgen.

Da die Farben hervorgerufen werden, während das Licht an der Oberfläche des Prismas gebrochen wird, so könnte man zunächst der Ansicht sein, daß das Prisma dem Lichte die Farben mitteilte. Dann würde man erwarten müssen, daß Prismen aus verschiedenen Stoffen auch verschieden auf das Licht einwirken müßten. Entwirft man aber das Spektrum mit Prismen aus verschiedenen Glassorten, aus Bergkrystall, aus Wasser, welches in einem prismatischen Gefäße enthalten ist, u. s. w., so erhält man stets dieselbe Erscheinung, nur daß, was Newton freilich übersah, die Länge des ganzen Spektrums oder die Länge der einzelnen Farben in demselben sich ändert. Das Prisma kann also nur die Veranlassung werden, daß aus dem Lichte die Farben hervortreten. Ihre Ursache ist demnach im Lichte zu suchen. Um sie klar zu legen, brachte Newton in dem Schirme, auf welchem das Spektrum entworfen wurde, eine kleine Öffnung so an, daß das auffallende Licht zum Teil hindurchgehen mußte. Durch geringe Drehung des Prismas um seine brechende Kante konnte er dann auf die Öffnung Strahlen der verschiedenen Farben gelangen lassen. Ein farbiger Strahl ging durch die Öffnung und in diesen stellte er ein zweites Prisma,

dessen brechende Kante gleichfalls nach unten gerichtet war. Beim Durchgang durch dieses wurde nun der Strahl zwar nochmals gebrochen, aber er wurde nicht wieder in Farben zerlegt. Mit welcher Farbe er auch den Versuch anstellte, er erhielt nur ein rundes einfarbiges Bild auf dem zweiten Schirme. Hieraus zog er den Schluß, daß das weiße Licht zusammengesetzt sein müsse aus Licht von allen im Spektrum vorkommenden Farben, daß aber die verschiedenen Farben durch die verschiedene Brechbarkeit der Strahlen bedingt seien, so zwar, daß das violette Licht das brechbarste, das rote Licht das am wenigsten brechbare wäre. Nicht mehr brechbares Licht wäre demnach einfaches oder

Fig. 75.



homogenes. Newton versäumte nicht diese Folgerung durch weitere Versuche zu prüfen. Er ließ einen Strahl weißen Lichtes durch zwei Prismen mit gekreuzten brechenden Kanten fallen, und erhielt dann ein geneigtes Spektrum, in dem wieder das Rot am wenigsten, das Violett am meisten gebrochen war. Dieser Versuch, dem er die meiste Beweiskraft zuschrieb, ist das sprichwörtlich gewordene Experimentum crucis. Als er dann das Licht, welches ein Prisma a, Fig. 75 durchsetzt hatte, auf ein diesem gleiches b fallen ließ, dessen brechende Kante aber die entgegengesetzte Lage hatte wie die des ersteren, erhielt er auf dem den Strahl auffangenden Schirme ein weißes Bild der Öff-

nung. Das Prisma b hatte die von a ausgebreiteten Strahlen also wieder gesammelt und sie alle zusammen gaben weiß. Die beiden dreiseitigen Prismen verhalten sich also wie ein vierseitiges mit zwei parallelen Flächen, durch welche ja das Licht geht ohne gefärbt zu werden. Daß das Licht der Spektralfarben zusammen weiß giebt, ist dann auch dadurch nachzuweisen, daß man die durch ein Prisma gegangenen Strahlen auf eine Linse fallen läßt, die sie in ihrem Brennpunkte vereinigt. Man erhält in demselben ein weißes Sonnenbild. Endlich hat man den nämlichen Nachweis noch dadurch geführt, daß man ein Prisma mittelst eines Uhrwerks in rascher Folge sich um eine der brechenden Kante parallele Achse ein wenig hin und her drehen ließ. Dadurch wurde das Spektrum auf einem dahinterliegenden Schirm so rasch auf und abwärts geführt, daß es seine mittleren Lagen mit großer Geschwindigkeit wechselte und ein Auge von der Stelle des Schirmes, auf welcher sie sichtbar waren, die Eindrücke einer Spektralfarbe erhielt, ehe noch der Eindruck der andern erloschen war. Diese Stelle erschien weiß. Mit Pigmentfarben läßt sich in ähnlicher Weise Weiß herstellen, wenn man auf eine Scheibe, die in verkleinertem Maße Fig. 76 darstellt, Papiere von der beigeschriebenen Farbe klebt und diese am besten in der Art, wie es beim Brummkreisel geschieht, in rasche Rotation versetzt. Dazu kann man das Papier auf demselben einfach befestigen. Bei rascher Rotation erscheint dann das Papier weißlichgrau und um so weißer, je reiner die Farben sind. Ganz weiß wird es freilich nie, weil die Farben der Buntpapiere nie die Reinheit der Spektralfarben zeigen.

Fig. 76.

Die vorgeführten Resultate der Newtonschen Farbenlehre sind später vielfach, nie aber mit größerer Erbitterung als von Goethe angegriffen worden. Goethe machte dem englischen Mathematiker

namentlich zum Vorwurf, daß derselbe, indem er das Licht durch Spalten in dunkle Kammern hineinquälte, der Natur den herbsten Zwang anthue. Des großen Dichters Farbenlehre, obwohl dieselbe eine Fülle der schönsten Beobachtungen in treffendster Weise schildert, hat indessen die Newton'sche nicht erschüttern können. Ihr Hauptinteresse ist ein psychologisches und liegt in dem tiefen, aber notwendigen Widerwillen, mit dem der Dichter sich gegen die mathematische Behandlung der Natur auflehnte.*)

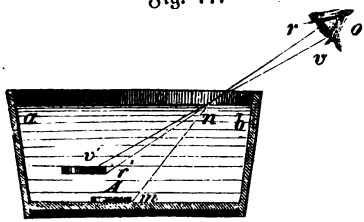
Die sieben Spektralfarben Newtons sind nun durchaus nicht so zu fassen, als ob sie im Spektrum unvermittelt neben einander lägen. Vielmehr gehen sie so in einander über, daß man nicht bestimmen kann, wo die eine beginnt, die andere aufhört. Ebenso ändert dieselbe Farbe ihre Nuance von Linie zu Linie. Genau genommen hat man es also nicht mit sieben, sondern mit unendlich vielen Strahlen verschiedener Farbe, also verschiedener Brechbarkeit zu thun. Kommen dieselben aber alle zusammen und zwar jede mit einer ihr eigentümlichen Stärke in unser Auge, so verursachen sie die Empfindung, die wir weiß nennen. Nimmt man umgekehrt eine oder mehrere von diesen Spektralfarben aus dem weißen Lichte heraus, so erhält man ebenfalls eine Farbe. Da sich dieselbe mit den abgesonderten zu weiß ergänzen muß, so nennt man sie die Komplementärfarbe der abgesonderten. Mit Pigmenten lassen sich nach dem obigen Komplementärfarben nur sehr annähernd herstellen. Mit wenig Berechtigung geschieht es deshalb, wenn man rot und grün, orange und blau, gelb und violett gewöhnlich als komplementär betrachtet.

Auf die Geschwindigkeit des Lichtes hat übrigens die Farbe keinen Einfluß. Strahlen aller Farbe legen dieselben Wege genau in denselben Zeiten zurück. Sonst müßte ja die Sonne, wenn sie bei klarem Himmel aufgeht, nicht weiß erscheinen, sondern erst in der schnellsten Farbe, nachher in Mischfarben dieser

*) Vgl. den Aufsatz: Über Goethes naturwissenschaftliche Arbeiten in Helmholtz, populäre wissenschaftliche Vorträge. I. Heft. S. 42 ff.

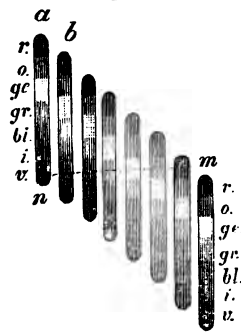
und der nach dem Grade ihrer Geschwindigkeit folgenden erscheinen und umgekehrt bei Sonnenuntergang. Ebenso könnten die Monde des Jupiters bei ihrer Verfinsterung nicht als weiße Punkte verschwinden und nach derselben ebenso wieder sichtbar werden. Auch hier müßten Farben auftreten.

Fig. 77.



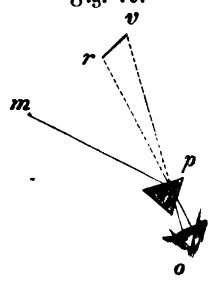
Da wir nun die Gesetze des Lichtes nur für weißes Licht aufgestellt haben, so haben wir nunmehr zunächst nachzuweisen, daß sie auch für das homogene gelten. Wir beginnen diesen Nachweis damit, daß wir die oben erwähnten Farbenränder, die bei einer einmaligen Brechung entstehen, erklären. Von dem äußersten Punkte des weißen, im Wasser befindlichen Porzellandeckels, welcher dem Auge zugekehrt ist, geht ein Strahl weißen Lichtes aus, welcher an der Stelle gebrochen wird, wo er das Wasser verläßt. Dabei wird das rote Licht weniger, das violette mehr gebrochen, die dazwischen liegenden Farben mehr als rot, weniger als violett. Ist also ab, Fig. 77, die Oberfläche des Wassers, A der Deckel, so werden in das Auge bei O von dem Punkte m ein violetter Strahl mnv und ein roter mnr fallen. In ihrer Verlängerung wird das Auge also zwei farbige Punkte v' und r' sehen. Die übrigen Farben werden farbige Punkte zwischen v' und r' erzeugen und so wird anstatt des Punktes bei m ein Spektrum v'r' erscheinen, welches an der dem Auge zugewendeten Seite das rot zeigt. Denkt man sich nun den weißen Körper in Linien zerlegt parallel der Ebene, welche

Fig. 78.



senkrecht auf derjenigen der Strahlen v'r'vr steht, so müssen alle diese Punkte Spektra entwerfen, welche sich zum Teil decken. Ist a, Fig. 78, das erste derselben, b das zweite u. s. w., so wird das rot des zweiten auf das orange des ersten fallen dasjenige des dritten auf orange und gelb des zweiten u. s. w. Bei nm werden alle Farben aufeinander fallen. Hier wird also die Linie weiß werden. Am äußersten Ende dagegen wird rot allein bleiben, an dieses wird sich eine Mischfarbe von rot und orange schließen u. s. w. Das Weiß in der Mitte der Linie wird also nach der einen Seite durch gelbliche Farbentöne in rot, auf der andern, wie sich ebenso entwickeln läßt, durch bläuliche in violett übergehen. Der Versuch gelingt natürlich nur, wenn der Grund des Gefäßes, auf dem der weiße Körper liegt, selbst schwarz ist; ist er ebenfalls weiß, so entwerfen seine Punkte auch Spektren und die Farben dieser fallen mit dem rot des Punktes m zusammen, sodaß auch hier weißes Licht entsteht oder wenigstens eine so wenig intensive Färbung, daß sie unbemerkt bleibt. Das Auge muß aber schief auf die Wasserfläche sehen, damit die Spektren breit genug werden. Sind sie zu schmal, so werden sie nicht bemerkt.

Fig. 79.

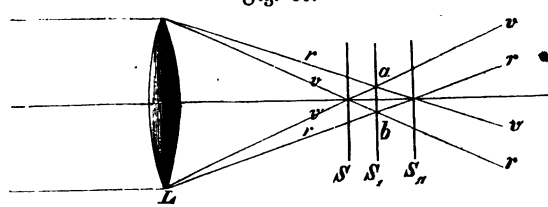


Ganz ähnlich erfolgt die Erscheinung, wenn man durch ein Prisma p, Fig. 79, eine weiße Fläche betrachtet. Der von dem einen Punkt m ausgehende Strahl entwirft ein Spektrum, welches das Auge in rv zu sehen glaubt. Die weiße Fläche erscheint oben violett und blau, unten rot und gelb begrenzt. Da die Spektren wegen der zweimaligen Brechung aber viel länger sind als vorhin, so sind die auftretenden Farben reiner und deshalb brillanter.

Damit Farben entstehen, wenn ein Lichtstrahl durch zwei brechende Ebenen geht, müssen dieselben also einen Winkel bilden.

Sind sie parallel, so treten die Strahlen nach der zweiten Brechung parallel aus und können dann nur zu merklich schmalen Farbenrändern Veranlassung geben, die sich auch nicht verbreitern, wenn sich das Auge von den brechenden Flächen entfernt, wie dies bei den durch das Prisma hervorgerufenen Farbenrändern der Fall ist. Dann aber müssen auch bei der Brechung des Lichtes dieser Linsen Farben auftreten. Daß dies in der That so ist, davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man eine Sammellinse in die Sonne hält, einen Schirm zunächst in ihren Brennpunkt rückt und dann der Linse mehr nähert und entfernt. Das weiße Sonnenbildchen, welches sich im Brennpunkte zeigt, wird in den beiden andern Stellungen größer und ist bei genäherter Linse von einem roten, bei entfernter von einem blauen Rand

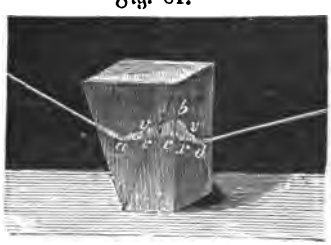
Fig. 80.



umgeben. Die Farben dieses Randes entstehen folgendermaßen. Ist L, Fig. 80, die Sammellinse, auf welche parallele Sonnenstrahlen auffallen, so werden die violetten am meisten, die roten am wenigsten stark gebrochen. Demnach liegt der Vereinigungspunkt der ersteren der Linse näher, etwa bei S, der der letzteren weiter entfernt, in S_{11}. Die Vereinigungspunkte der Strahlen anderer Farben liegen demnach auf der Linie SS_{11}, deren verschiedene Punkte sie bilden. Auf einem in S aufgestellten Schirm wird also ein heller Kreis entworfen werden, in dessen Mitte alle Farben vertreten sind, während sich an seinem Rande nur rot befindet; nach Innen zu folgen auf diesen Rand die Mischfarben rot-orange, rot-orange-gelb ꝛc. Der rote Rand wird also durch eine gelbliche Färbung in weiß übergehen. Ebenso erhält man

bei S_{II} eine weiße Mitte mit blau-violettem Rande. Bei S_I, etwa im Vereinigungspunkte der grünen Strahlen entsteht, da hier die kleine Fläche ab nahezu von allen Farben beleuchtet ist, ein fast weißes Scheibchen. Hieraus ergiebt sich, daß eine Linse einen Lichtpunkt nie als Punkt abbilden kann. Derselbe wird auch bei genauester Einstellung des Schirmes höchstens als weißes Scheibchen erscheinen können. Die dadurch entstehende Abweichung der Strahlen von der in Fig. 37 gezeichneten Bahn führt den Namen der chromatischen Aberration. Bei den Zerstreuungslinsen erhält man keine merklichen Farbenränder, weil solche bei den virtuellen verkleinerten Bildern, die diese Linsen stets geben, viel zu schmal sind, als daß man sie wahrnehmen könnte.

Fig. 81.



Die chromatische Aberration ist nun bei der Konstruktion der Refraktoren höchst störend, sie kann diese Instrumente ganz unbrauchbar machen. Deshalb ersetzte, wie wir sahen, Newton dieselben durch die Spiegelteleskope, da er daran verzweifelte, daß Mittel, sie wegzuschaffen, gefunden werden könnten. Daß dies aber doch möglich sei, wies 1747 Euler nach und die Herstellung der ersten Linse ohne chromatische Aberration, der ersten achromatischen Linse gelang 1757 Dollond.*) Der Irrtum Newtons kam daher, daß er, wie wir auch bereits andeuteten, übersehen hatte, daß Prismen aus verschiedenen Substanzen verschieden lange Spektren geben. Darin liegt aber gerade die Möglichkeit Prismen herzustellen, welche in der Art, wie es Fig. 81 zeigt, nicht die Brechung, aber die Farbenzerstreuung aufheben. Solche achromatische Prismen müssen nur aus verschieden stark

*) John D., geb. 1706 in London, war bis 1752 Seidenweber, legte dann mit seinem Sohne eine optische Werkstatt an. Er starb 1761 in London.

brechenden Stoffen hergestellt und so geschliffen werden, daß das eine die von dem anderen auseinandergelegten Strahlen wieder in einen Punkt vereinigt, avbvd stellt dann den Weg der violetten, arerd denjenigen der roten Strahlen dar. Da aber die Flächen a und d nicht parallel sind, so bleibt die Brechung bestehen. Nachdem Dollond gezeigt hatte, daß mit Hilfe des stärker brechenden Flint- und des schwächer brechenden Crownglases solche Prismen leicht erhalten werden können, war auch die Frage nach der Konstruktion der achromatischen Linse gelöst. Man hatte nur eine Sammellinse aus Crownglas und eine Zerstreuungslinse aus Flintglas zusammenzusetzen, denen solche Halbmesser gegeben waren, daß die roten und violetten Strahlen in denselben Punkt vereinigt wurden. Nun läßt sich dann freilich nicht erreichen, daß dieser Punkt zugleich auch der Vereinigungspunkt aller Strahlen anderer Brechbarkeit ist, Farbenränder werden also bleiben, aber sie werden doch so schwach sein, daß sie nicht mehr stören können. Wollte man sie ganz entfernen, so bedürfte man mehrerer solcher Linsenkombinationen, die dann freilich eine nicht unbedeutende Schwächung des Lichtes zur Folge haben würden.

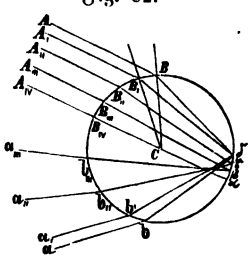
Der Regenbogen.

Die Farben, die Newton mittelst seines Prismas erhielt, nannte er, wie wir sahen, die Regenbogenfarben, da sie diese prachtvolle Himmelserscheinung ebenfalls zeigt. Sie fällt zu sehr in die Augen, als daß sie jemals hätte übersehen werden können, und so finden wir denn auch bis ins höchste Altertum hinauf den Regenbogen als Gegenstand eifrigster Forschung. Die ersten Erklärungen des Phänomens waren selbstverständlich mythologischer Natur und haben physikalisch keinen Wert, dasselbe gilt indessen auch von den naturwissenschaftlichen Erklärungen der Alten, weil dieselben stets voraussetzten, die Wolke als Ganzes brächte die Erscheinung hervor. Erst als im Anfange des

14. Jahrhunderts Theodorich von Freiberg*) ausführte, daß die einzelnen kugelförmigen Tropfen, aus denen die Wolke besteht, vermöge der Reflexion und Brechung der auf sie fallenden Strahlen das reiche Farbenband bewirkten, war die Bahn betreten, auf welcher eine befriedigende Erklärung desselben gewonnen werden konnte.

Fällt auf einen Regentropfen ein Sonnenstrahl bei B auf, Fig. 82, so muß er zunächst nach δ gebrochen, hier nach b reflektiert werden und kann dann erst nach nochmaliger Brechung ins Auge a gelangen. Konstruiert man nun eine Anzahl anderer solcher Strahlen, die bei B_1, B_{11}, B_{111} ꝛc. die Oberfläche des Tropfens treffen, so sieht man, daß dieselben zunächst einen um so größeren Winkel mit ihrer ursprünglichen Richtung bilden, je weiter sie von der Linie auffallen, die die Sonne mit dem Mittelpunkt des Tropfens verbindet. Die bei B und B_1 auffallenden aber treten parallel wieder aus, wie sie eingetreten sind, während Strahlen, die jenseits B ankamen, wieder in den Raum zwischen a', b_1 und A_1B_1 hinein gelangen werden. Während also alle Strahlen, außer den bei A auffallenden, sich auf einen um so größeren Raum zerstreuen, je weiter sie sich von dem Tropfen entfernen, so ist dies bei den zuletzt genannten nicht der Fall. Ein in ihrer Richtung nach dem Tropfen blickendes Auge sieht diesen also heller als die benachbarten, von denen nur zerstreutes Licht zu ihm gelangt, und wenn nun, wie es bei einer Regenwolke der Fall ist, Tausende von Tropfen sich hintereinander befinden, so verstärken diese ihre Wirkung, während die zerstreut zurückgehenden Strahlen nur die Wolke als solche sichtbar machen können.

Fig. 82.

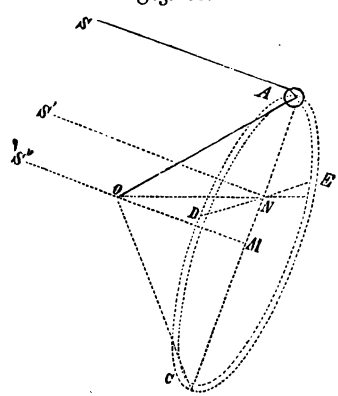


*) Lebte um 1300, war Dominikanerprior einer Ordensprovinz in Sachsen. Später wurde er nach Paris gesandt.

Die parallel austretenden Strahlen gelangen aber nur von solchen Tropfen ins Auge, für die der Winkel SAO, Fig. 83, oder der ihm gleiche AOM einen bestimmten Wert von beiläufig 42° hat, also von allen Tropfen, die von der Linie OA getroffen werden, wenn man sie um OM als Achse rotieren läßt. Sie liegen also in einem Kreise ADCE, welcher dem Auge heller erscheint als die Umgebung, und geben somit als wirksame Strahlen Veranlassung zu dem Regenbogen.

Aber dieser Kreis erscheint auch farbig. Denn da die roten Strahlen bei der doppelten Brechung weniger gebrochen werden als die violetten, so ergiebt sich aus der Betrachtung von Fig. 84, daß von dem obersten Tropfen nur rotes, von dem zweiten nur orangefarbiges ꝛc. Licht in ein bei O befindliches Auge gelangt, so daß dieses Farben in der Reihenfolge von rot bis violett über einander gelagert zu sehen glaubt. Diese Farben würden ganz rein sein, wenn die Sonne ein Lichtpunkt wäre, da sie aber unter einem gewissen Gesichtswinkel erscheint, so entwerfen alle ihre Punkte Spektren, die sich teilweise decken und so in der Weise, wie es bei Betrachtung der Fig. 78 auseinandergesetzt wurde, Veranlassung zu Mischfarben geben.

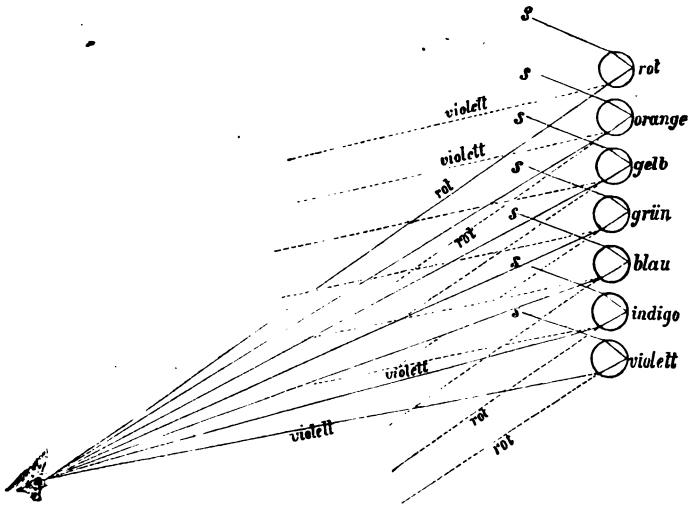
Fig. 83.



Steht nun die Sonne noch 42° über dem Horizont, so fällt der Kreis AC noch unter denselben, der Regenbogen erscheint nicht, da gewöhnlich die Tropfen im Vergleich zum Auge nicht tiefer liegen als der Horizont, oder wenn dies der Fall sein sollte, der Regenbogen selten intensiv genug ist, um vor den nahe liegenden Gegenständen der Umgebung des Beobachters sichtbar

zu werden. Doch sieht man ihn in solcher Lage wohl in den herabfallenden Tropfen eines Springbrunnens oder aus der oberen Etage eines Hauses im Platzregen, der bei Sonnenschein herabstürzt. Sinkt dann die Sonne, so wird ein immer größeres Stück des Bogens über dem Horizonte sichtbar. Macht sie beispielsweise mit dem Horizonte, den die Ebene ODNE Fig. 83 darstellen möge, einen Winkel S'NO, so wird das Stück DAE des Bogens gesehen werden können. Bei Sonnenuntergang wird der Bogen zum

Fig. 84.



Halbkreis. Da dann das Sonnenlicht meist rot wird, so erscheint auch der Regenbogen dann oft ganz rot. An der Stelle, wo der Regen auffällt, scheint der Regenbogen auf dem Boden zu stehen. Mit dem Standpunkte des Beobachters ändert sich nun stets der Mittelpunkt des Kreises, also auch die Lage desselben. Aus diesem Grunde kann die Stelle, wo er aufsteht, nie erreicht werden und es sehen zwei Beobachter stets verschiedene Regenbögen. Da wir endlich den Bogen immer auf den Hinter-

grund, vor dem er erscheint, projicieren, so scheint er am Himmel viel größer zu sein, als ihn der Beobachter, der ihn in den Tropfen eines Springbrunnens erblickt, sieht. Ganz kurze, in Wolken auftretende Stücke eines Regenbogens nennt man auch wohl Regengallen.

Neben diesem Bogen, dem Hauptregenbogen, tritt nun bei genügend hellem Sonnenlicht, in gewissem Abstand von ihm, immer noch ein zweiter auf, der Nebenregenbogen, fälschlich auch Widerschein genannt, welcher, indem er die Farben in entgegengesetzter Reihenfolge zeigt, den Hauptregenbogen einschließt. Er entsteht durch zweimalige Reflexion im Innern des Tropfens und zweimalige Brechung. Der Sonnenstrahl beschreibt demgemäß den Weg ABCDEF, Fig. 85, und es tritt hier dieselbe Erscheinung ein wie beim Hauptregenbogen, daß die Ablenkung einen gewissen größten Wert erreicht, dann aber wieder abnimmt, während die Punkte, wo die Strahlen einfallen, in derselben Richtung auf dem Kugelkreis fortrücken. Auch hier werden demnach wirksame Strahlen auftreten, von denen zwei in der Figur gezeichnet sind und es muß dadurch Veranlassung zu einem kreisförmigen hellen Bogen gegeben werden, dessen Mittelpunkt mit demjenigen des Hauptregenbogens zusammenfällt. Nur der Winkel APF, unter dem er erscheint, muß ein anderer sein, er beträgt 51°. In gleicher Weise muß Farbenzerstreuung ein-

Fig. 85.

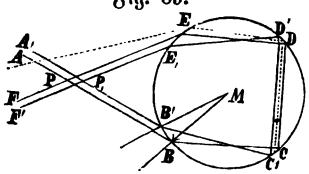
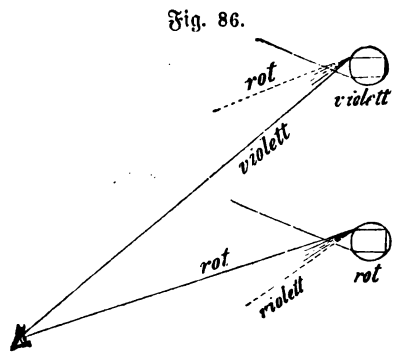


Fig. 86.



treten, da nach Anleitung von Fig. 86 von übereinanderliegenden Tropfen verschiedene Farben ins Auge gelangen. Weil aber der eine Tropfen, welcher violett erscheint, oberhalb eines rot erscheinenden liegt, so treten die Farben in umgekehrter Reihenfolge auf wie beim Hauptregenbogen.

Auch das vom Meer gespiegelte Sonnenbild kann einen Regenbogen hervorrufen, nur in seltenen Fällen reicht aber die Lichtstärke seiner Strahlen dazu aus. Dagegen sind Mondregenbogen nicht so sehr selten, aber meist so wenig hell, daß man Farben an ihnen kaum unterscheiden kann. Endlich kommen vor Nebelwänden weiße Bögen vor, welche, wie Bravais*) auf mathematischem Wege gezeigt hat, dann entstehen, wenn die Dicken der hohlen, den Nebel bildenden Wasserkügelchen unter eine gewisse Größe herabsinken. Wird dagegen die Größe überschritten, so tritt auch in solchen Nebeln der farbige Bogen auf.

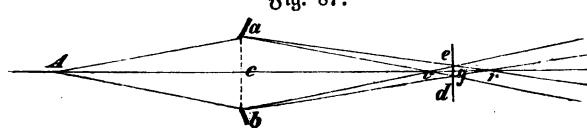
Farbenerscheinungen im Auge.

Wenn bei den Linsen, beim Regenbogen ꝛc., infolge der Brechung Farben auftreten, so müssen solche auch auf der Netzhaut des Auges erscheinen, zu welcher das Licht ja nur nach mehrfachen Brechungen gelangen kann. Trotzdem gelang es früher nicht, diese Farben zu beobachten, und man glaubte deshalb, die Eigenschaft der Achromasie, welche das Auge vor den andern optischen Instrumenten voraus zu haben schien, dadurch erklären zu müssen, daß der in ihm vorhandene brechende Apparat aus mehreren Linsen bestände. Diese Ansicht schien noch bestätigt zu werden durch die Konstruktion der achromatischen Linsen, womit Dollond in der That die Linsensysteme des Auges nachzuahmen glaubte. Trotzdem ist die Annahme, daß das Auge achromatisch sei, ein Irrtum, es zeigt vielmehr, wie die meisten andern optischen Apparate, auch

*) Auguste B., geb. 1811 zu Annonay, war erst Marinelieutenant, dann Prof. in Lyon, zuletzt in Paris, von wo er viele wissenschaftliche Reisen machte. Er starb 1863 in Versailles.

chromatische Aberration, von deren Vorhandensein man sich leicht durch folgende Versuche überzeugen kann. Man fixiere einen in einiger Entfernung vor einer brennenden Lampe mit Milchglasschirm aufgestellten Gegenstand, eine Nadelspitze z. B., und richte, was allerdings sogleich nicht gelingen wird, ohne die Augen zu verstellen, seine Aufmerksamkeit auf den hellen Schirm, so wird man denselben von einem bläulichen Rande umgeben sehen. Stellt man dagegen den Gegenstand so hinter dem Schirme auf, daß man ihn an diesem vorbeiblickend gerade noch sehen kann, so bemerkt man, daß der Schirm von einem roten Rande eingefaßt ist. Die Erklärung dieser Thatsachen ist die folgende: Ist A, Fig. 87, ein leuchtender Punkt, ab die Pupille, r der Vereinigungspunkt der roten, g der der grünen und v der der violetten Strahlen nach ihrer Brechung in wässeriger Feuchtigkeit, Linse und Glaskörper, so wird beim Accommodieren der Linse eine

Fig. 87.



solche Krümmung gegeben, daß der Punkt g auf die Netzhaut zu liegen kommt. Wird aber auf einen näheren Punkt als A accommodiert, so fällt ein näher an v liegender Punkt auf die Netzhaut, das Bild von A muß also ein weißes Scheibchen mit bläulichem Rande sein, und wenn das Auge auf einen ferneren Punkt eingestellt wird, so wird das Bild zu einem weißen Scheibchen mit rotgelbem Rande. Wird dagegen das Bild gerade auf der Netzhaut entworfen, so werden die roten und violetten Strahlen auf einen gleich großen Kreis zerstreut. Wie bei den Bildern, welche Sammellinsen von einem weißen Punkte hervorrufen, scheint alsdann jener Kreis weiß zu sein. Farbige Ränder erhält man aber bei obigem Versuche auch, wenn man, während man den Lampenschirm fixiert, die Pupille durch einen dunkeln

Körper, ein Stück Pappe oder den Naſenrücken bei ſchief gehaltenem Kopf, zum Teil verdeckt. Auch dies läßt ſich leicht mit Hilfe von Fig. 87 erklären, wenn man die Hälfte der Pupille cb ſich verdeckt denkt. Es werden alsdann die violetten Strahlen in cbv, die roten in cbr wegfallen. Auf dem Teile gd der Netzhaut verſchwindet alſo das rote, auf dem Teile eg das violette Licht. Da nun das Bild im Auge ein umgekehrtes iſt, ſo rückt von e das Bild des Schirmes auf der Netzhaut nach d. Nach der Seite des Schirmes zeigt alſo das Bild einen roten Rand.

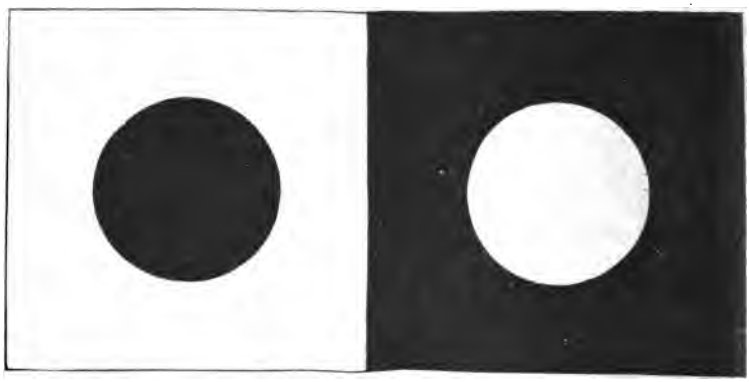
So breit wie bei Glaslinſen ſind dieſe farbigen Ränder aber nicht, da die brechende Kraft des Auges kleiner als die des Glaſes iſt; ſie iſt etwa nur ſo groß, als beſtänden ſeine brechenden Teile ganz aus Waſſer.

Will man nun etwas ſcharf ſehen, ſo accommodiert man ſo, daß das Bild des Gegenſtandes in g entworfen wird. Das Bild eines Lichtpunktes iſt demnach nie ein Punkt, ſondern ſtets ein kleiner weißer Kreis. Als ſolcher erſcheint nun jeder Lichtpunkt auch infolge der ſphäriſchen Aberration, die das Auge ebenfalls beſitzt, wenn auch, da die centrale Subſtanz der Linſe ſtärker bricht als die peripheriſche, in nur geringem Maße. Anſtatt eines Lichtpunktes wird alſo immer ein heller Kreis geſehen. Helle Gegenſtände auf dunkelm Grunde müſſen deshalb größer erſcheinen, als gleichgroße dunkle auf hellem Grunde, eine Erſcheinung, die man Irradiation genannt hat. Man kann ſich von derſelben leicht überzeugen, wenn man die beiden Kreiſe Fig. 88 betrachtet. Obwohl ſie genau gleich groß ſind, ſo erſcheint, namentlich bei Beobachtung aus einiger Entfernung, doch der weiße auf ſchwarzem Grunde größer als der ſchwarze auf weißem, weil die Kreiſchen, als welche die Punkte der weißen Fläche geſehen werden, über die ſchwarze Fläche übergreifen. Aus demſelben Grunde ſcheinen die weißen Flächen des Schachbrettes an den Ecken die ſchwarzen zu unterbrechen. Je heller der leuchtende Körper, deſto ſtärker iſt die Irradiation. So ſcheint eine Lichtflamme, vor welche man ein Lineal hält, eine tiefe Lücke in demſelben auszufreſſen,

erscheint das glühende Stück eines Drahtes viel dicker als das dunkle, erscheint endlich die Mondsichel viel größer als der durch das Erdlicht sichtbar gemachte übrige Teil des Mondes.

Die Netzhaut ist nun für die Empfindung der Farben keineswegs in allen Teilen gleich gut befähigt. Während wir in Bildern, die auf dem gelben Fleck und seiner Umgebung entworfen werden, die feinsten Farbennuancen leicht unterscheiden, so haben die peripherischen Teile der Netzhaut, die freilich stets nur undeutliche Bilder zu unserm Bewußtsein bringen können, die Fähigkeit der Farbenempfindung gar nicht mehr, sie lassen

Fig 88.



nur hell und dunkel erkennen. Wie wir aber bereits sahen, hält ein jeder Nerv die Empfindung eines Reizes etwas länger fest, als der Reiz selbst dauert, und zwar um so länger, je vollständiger er vorher geruht hat und je intensiver der Lichtreiz ist. Hält man also längere Zeit die Hände vor die Augen und sieht dann auf einen Moment nach einem hellen Fenster oder einer brennenden Lampe, so beobachtet man leicht, daß der betrachtete Gegenstand kurze Zeit nach dem wieder erfolgten Schließen der Augen noch gesehen wird, daß ein positives Nachbild bleibt. Namentlich gut läßt sich dasselbe am Morgen kurz nach dem

Erwachen sehen, wo die lange Nachtruhe die Empfindlichkeit der Nerven auf das höchste gesteigert hat. Beobachtet man dann nach dem Schließen der Augen weiter, so bemerkt man, daß mit dem Erlöschen des positiven Nachbildes der Gesichtseindruck durchaus nicht erloschen ist. Vielmehr verliert sich derselbe erst nach und nach, nachdem er in öfterem Wechsel die verschiedensten Farben angenommen hat, zum langsam verklingenden negativen Nachbild geworden ist. Hat man zu lange in die untergehende Sonne gesehen, so kann dies negative Nachbild, welches überall sich uns wieder aufdrängt, wohin wir auch den Blick wenden mögen, zur wahren Qual werden. Diese frappierende Erscheinung hat Young auf das glücklichste durch die Annahme erklärt, daß das Auge dreierlei farbenempfindende Elemente besitze, solche für rote, grüne und violette Strahlen, und daß nur in den grünempfindenden der Reiz ganz gleichmäßig mit der Zeit erlischt, während bei den andern das Erlöschen anfangs rascher erfolgt als später, namentlich rasch im Anfang aber bei den roten. Während demnach die Empfindung des Roten verhältnismäßig schwach geworden ist, ist die des Violetten und Grünen noch stärker, das Nachbild zeigt eine violette Färbung; darauf nimmt die Empfindungsstärke des Violetten stärker ab als die des Roten, das Nachbild muß somit eine Mischfarbe von rot und grün zeigen u. s. w. Die Empfindung einer bestimmten Farbe entsteht aber dadurch, daß die drei Nervenarten verschieden stark erregt werden. Gelb z. B. erregt die rot und grün empfindenden Nerven mäßig stark, die violetten schwach, blau dagegen die violett und grün empfindenden stärker als die das rote Licht vermittelnden, während weiß alle Fasern gleichmäßig erregt. Es ist möglich, daß die Empfindlichkeit der Fasern für verschiedenfarbiges Licht durch Pigmenttröpfchen hervorgerufen oder wenigstens gesteigert wird, welche sich vor ihren Enden befinden. Jedenfalls muß das Licht, welches zu den Nervenenden im gelben Flecke gelangt, durch ein gelbes Pigment hindurchgegangen sein und dieser Umstand muß dazu beitragen, daß die Irradiation

an dieser Stelle möglichst gering wird, weil im gelben Lichte die Zerstreuungskreise kleiner werden als im weißen. Hält man ein gelbes Glas vor das Auge, so verringert dies noch mehr die Größe der Zerstreuungskreise und in der That sehen wir alsdann die Gegenstände schärfer begrenzt als bei gewöhnlicher Betrachtungsweise.

Eine wichtige Stütze fand nun die Young'sche Farbentheorie in dem Vorkommen einer Anomalie des Auges, in der gar nicht seltenen Rotblindheit (Daltonismus), die darin besteht, daß die damit behafteten Augen eine Anzahl Farben, namentlich grün und rot nicht als solche, sondern nur nach dem Grade ihrer Helligkeit unterscheiden können. Viel seltener kommt die ähnliche Krankheit der Blaublindheit vor, in der das Erkennungsvermögen der blauen Farbe nicht vorhanden ist. Alle Beobachtungen, die man an Rot- und Blaublinden gemacht hat, finden nun leicht ihre Erklärung in der Annahme, daß bei jenen die rotempfindenden, bei diesen die blauempfindenden Nervenenden entweder fehlen oder doch unempfindlich sind, eine Annahme, die sich als direkte Folgerung aus der Young'schen Theorie ergiebt. In neuerer Zeit hat die Rotblindheit, die doch schon längst bekannt war, mannigfache Besprechung erfahren, indem die Befürchtung auftauchte, daß die bei Eisenbahnen häufig gebrauchten roten und grünen Signale Veranlassung von Eisenbahnunglücken werden könnten, wenn zufällig Rotblinde unter den Bahnbeamten vorhanden wären. Man hat infolge dessen das Bahnpersonal überall auf Rotblindheit untersuchen lassen, da aber die Rotblinden imstande sind die grünen und roten Nuancen doch an ihrer Helligkeit zu erkennen, so ist dabei manche Übertreibung mit untergelaufen. Immerhin aber ist es als eine zweckmäßige Maßregel zu bezeichnen, daß man die farbigen Signale zum großen Teil durch weithin sichtbare geometrische Figuren ersetzt hat.

Wenn wir oben gesehen haben, daß die Augennerven eine Zeit lang die erregte Empfindung beibehalten, so darf dies keineswegs so aufgefaßt werden, als ob die Nachempfindung längere Zeit anhielte. Nach verhältnismäßig kurzer Zeit ist sie vielmehr

erloschen und die Nervenfasern befinden sich wieder in ihrem gewöhnlichen Zustand. Ja es hört sogar die Empfindungsfähigkeit der Nerven sehr bald auf, wenn ein zu lange dauernder Reiz auf sie ausgeübt wird, und sie bedürfen kürzerer oder längerer Ruhe, um wieder vollständig sensibel zu werden. Dies läßt sich leicht durch die bekannte Thatsache erhärten, daß an Stelle eines Stückchen farbigen Papiers, welches auf weißes gelegt, längere Zeit betrachtet und dann plötzlich hinweggezogen wurde, nunmehr seine Komplementärfarbe erscheint. Durch den Anblick des Buntpapieres waren die durch seine Farben erregten Nervenenden bis zur Unerregbarkeit ermüdet. Sie werden nach Wegnahme des Papieres mithin nicht erregt durch die gleichgefärbten Strahlen, die im weißen Lichte vorkommen. Das nach Wegnahme des Buntpapieres die betreffende Stelle der Netzhaut erregende weiße Licht wirkte somit nur auf die von jenem nicht in Anspruch genommenen Nervenenden, also auf diejenigen, welche die Farben zur Empfindung zu bringen haben, die jene zu Weiß ergänzen. Dadurch muß also in der That die Komplementärfarbe entstehen, ja man kann sie auf diese Art am leichtesten und sichersten für eine beliebige Farbe erhalten.

Mit dieser Erscheinung scheint auf den ersten Blick die der farbigen Schatten übereinzukommen, mit denen wir unsere Betrachtungen über das Auge abschließen.

Läßt man auf ein Papier, welches von Tageslicht, das durch eine enge Öffnung in ein dunkles Zimmer fällt, oder vom Mondlicht schwach beleuchtet ist, gleichzeitig das helle Licht einer Kerze fallen und hält einen schmalen Körper davor, so entwirft derselbe zwei Schatten. Der Schatten des Tageslichtes oder Mondlichtes ist nur vom rotgelben Kerzenlicht beleuchtet, er erscheint also in dieser Farbe, in der wegen des Vorherrschens des Kerzenlichtes die ganze Fläche gesehen wird, der Schatten des Kerzenlichtes dagegen nur vom Tageslicht oder Mondlicht, und müßte also weiß sein. Statt dessen zeigt er die Komplementärfarbe des rotgelben Grundes, blau. Daß diese Erscheinung

zum Teil durch einen dem eben auseinander gesetzten ähnlichen Vorgang hervorgerufen wird, folgt daraus, daß die Farben intensiver werden, wenn man den Blick auf dem vom Kerzenlicht beleuchteten Papier herumirren läßt. Daß aber nicht allein die Ermüdung von Nervenenden die entstehende Farbe hervorruft, ergiebt sich, wenn man durch ein Papprohr sieht von solchem Durchmesser, daß dadurch nur der eine Schatten sichtbar wird. Durch dies Rohr sieht man die weiße Fläche weiß; sie wird aber sofort blau, wenn man das Rohr auf die Grenze des Schattens richtet, somit die weiße und die rotgelbe Fläche nebeneinander erblickt. Die blaue Farbe bleibt aber auch, wenn man die Schatten erst ohne Rohr betrachtet und dann das Rohr vorsetzt. Dabei ist es dann einerlei, ob man nunmehr das Kerzenlicht wegnimmt, oder nicht. Man sieht erst dann die Fläche wieder weiß, wenn man das Rohr beseitigt und die bisher gesehene Fläche nunmehr mit der anderen vergleicht. Es kann also ebensowenig die blaue Farbe objektiv vorhanden, als die Ermüdung der Nerven der Grund ihrer Entstehung sein, er liegt in einer Täuschung unseres Urteils, die uns einen weiteren Blick in das Wesen der Empfindung der weißen Farbe thun läßt. Dieselbe ist zusammengesetzt aus den Empfindungen aller Farben, die in einem bestimmten Verhältnis ihrer Stärke auftreten müssen. Können wir nun eine weiße Fläche nicht dadurch als Weiß erkennen, daß wir sie mit anerkanntem Weiß vergleichen, so sind wir lediglich auf den Vergleich des Intensitätsverhältnisses der vorhandenen Farben angewiesen. Intensitätsbestimmungen sind aber vom Auge mit Sicherheit nie durchzuführen, so daß die Bestimmung des Weiß immer schwierig sein muß und geringe Störungen uns in dieser Schätzung ganz irre machen können. Daß unser Urteil gerade auf die Komplementärfarbe geleitet wird, mag darin seinen Grund haben, daß dieselbe infolge der Ermüdung der die Farbe der Fläche empfindenden Nervenenden zunächst immer erscheint. Doch kann auch hierbei die physiologische Beschaffenheit der Netzhaut eine bis dahin noch unbekannte Rolle spielen.

Absorptionsfarben fester und flüssiger Körper.

Wenn wir von rot, grün ꝛc. empfindenden Nervenfasern redeten, so konnten damit nur solche gemeint sein, welche durch Lichtstrahlen von bestimmter Brechbarkeit gereizt werden. Diese Lichtstrahlen gehen aber von Körpern aus und es müssen somit die Körper die Eigenschaft haben, solche Strahlen auszusenden, sie müssen eine bestimmte Farbe besitzen. Da nun die nicht leuchtenden Körper meistenteils farbig erscheinen, wenn sie von weißem Sonnenlicht getroffen werden, so kann ihre Farbe allein darin ihren Grund haben, daß sie nur einen Teil des auf sie fallenden Lichtes durchlassen oder zerstreut reflektieren.

Der Unterschied zwischen durchsichtigen und undurchsichtigen Körpern tritt hierbei sehr scharf hervor. Wir betrachten zunächst die ersteren. Blickt man durch ein farbiges Glas, so erscheint alles Licht in der Farbe des Glases, hält man es aber vor einen ganz dunklen Hintergrund, so erscheint es dunkel, wenn nicht gerade von seiner Oberfläche regelmäßig reflektiertes Licht in das Auge gelangt. Betrachtet man nun ein schmales, durch ein farbiges Glas gefärbtes Lichtband, wie man es am besten erhält, wenn man Sonnenlicht durch einen schmalen Spalt gehen läßt, vor den das Glas gehalten wird, durch ein Prisma, so entdeckt man leicht den Grund der Färbung. Statt des gewöhnlichen Spektrums sieht man nämlich bei rotem Glas nur ein breites rotes Band, das auf der einen Seite höchstens noch etwas Gelb und Grün zeigt. In dem Spektrum von Licht, welches durch grünes mit Eisenoxydul gefärbtes Glas gegangen ist, ist dagegen das grüne Licht ungeschwächt vorhanden, außerdem noch schwach gelbes und blaues, während das rote und violette Licht ganz fehlen. Nimmt man diese Gläser gleichzeitig vor das Auge und sind sie intensiv genug gefärbt, so läßt das eine nur solches Licht durch, welches das andere zurück hält, die Kombination beider läßt dann gar kein Licht mehr durch. Anders verhalten sich blaues mit Kobalt gefärbtes und violettes manganhaltiges Glas. Das Spektrum von weißem Licht,

welches durch sie gegangen ist, ist durch mehr oder weniger dunkle Banden in helle Streifen zerlegt, und zwar werden die dunklen Banden bei intensiverer Farbe breiter, so daß das Spektrum von dunkelblauem Kobaltglase nur aus einem korallenroten und einem blauen Lichtstreifen besteht. Ähnlich verhalten sich flüssige Körper. Eine Lösung von Kupferoxydammoniak in Wasser läßt bei genügender Konzentration nur blaues und violettes Licht durch, ihr Spektrum zeigt aber keine Banden. Solche zeigt dagegen eine ätherische oder alkoholische Lösung von Blattgrün, (Chlorophyll)*) in sehr ausgesprochener Weise. Bei mittlerer Konzentration zeigt das Spektrum wenig Blau und kein Violett, und in den anderen Farben vier dunkle Banden, von denen die schwärzeste im Rot, drei andere im Orange, Grün und im Blau auftreten. Diese Beispiele könnten leicht noch durch viele andere vermehrt werden. Die Erklärung der so auftretenden Farben ergiebt sich auf das zwangloseste, wenn man annimmt, daß die Körper, welche durchgehendes Licht färben, einen Teil der auf sie fallenden Strahlen zurückbehalten, absorbieren. Die übrigen mehr oder weniger geschwächt durchgelassenen können alsdann nicht mehr den Eindruck des weißen Lichtes ergeben, die Körper erscheinen in Absorptionsfarben, deren Intensität und Qualität mit der Konzentration und der Dicke der durchstrahlten Lösung sich ändern.

Es giebt wohl kaum einen Körper, der in genügend dicken Schichten nicht etwas Licht absorbierte. So absorbiert reines Wasser in etwa 2 m dicken Schichten soviel Licht, daß das durchgehende in dem prachtvollen Blau erscheint, welches den meisten Alpenseeen eine ganz besondere Schönheit verleiht. Die geringste Verunreinigung aber ändert dies Blau zunächst in grün, dann in ein schmutzig grünes Braun ab, welche Farbe die meisten Flüsse

*) Man stellt eine solche her, indem man grüne Blätter mehrmals auskocht und auspreßt und dann mit heißem Alkohol oder, nachdem sie genügend getrocknet sind, mit kaltem Schwefeläther übergießt.

zu haben pflegen. Sie verdanken dieselbe ihrem Gehalt an Humussäure, die durch Kalk vollständig niedergeschlagen wird, und der Kalkgehalt ist demnach mittelbar die Ursache der schönen Farbe der Schweizer und Tiroler Seeen. Ebenso ist nach Nordenskjölds *) Untersuchungen die Farbe des Meeres in den arktischen Breiten indigoblau, so lange dasselbe rein ist. Graugrüne und braune Stellen, die darin scharf begrenzt vorkommen, verdanken ihre Färbung einem im Meer befindlichen Schleim, der aus mehreren Arten von Diatomaceen besteht.

Größere Schwierigkeit macht die Erklärung der Farben undurchsichtiger Körper. Durch folgenden Versuch aber sind auch sie als Absorptionsfarben zu erkennen. Legt man ein Blättchen dünn geschlagenen Metalles, also z. B. ein Blatt Schaumgold zwischen zwei Glasplatten und sieht hindurch nach einer Dachgrenze, die sich gegen den hellen Himmel abzeichnet, so kann man diese recht wohl noch erkennen, der Himmel aber erscheint dunkelblau oder grün. Ebenso lassen dünne Silberschichten den hellen Himmel bläulich erscheinen u. s. w. Außer den Metallen lassen sich nur sehr wenige Körper in so dünnen Schichten herstellen. Doch werden wir annehmen dürfen, daß wenn dies möglich wäre, auch sie durchsichtig werden und Absorptionsfarben beobachten lassen würden. Nun glänzt aber Gold im auffallenden Lichte in der komplementären Farbe zu dem Blau, welches im durchfallenden Lichte auftritt, nämlich in Gelb. Es müssen also, wenn wir den hieraus zu ziehenden Schluß sogleich auf alle undurchsichtigen Körper ausdehnen, die farbigen unter denselben an ihrer Oberfläche einen Teil des auf sie fallenden Lichtes zerstreut reflektieren, einen anderen Teil absorbieren, und während jener Anlaß giebt zu ihrer Farbe, so wird dieser im Innern des Körpers zurückbehalten. Die Farbe, in der ein undurchsichtiger Körper erscheint, ist übrigens selten genau die Komplementärfarbe von der, welche

*) Adolf Erik N., geb. 1832 in Helsingfors, siedelte 1857 nach Stockholm über, machte von 1858—73 Reisen in die atlantischen Polarregionen und seitdem zwei Reisen an die Nordküste von Sibirien.

seine dünnen Schichten im durchfallenden Lichte zeigen. Dies kommt daher, daß eine Menge kleiner Unebenheiten oder Risse, die jede auch noch so glatt polierte Oberfläche aufweist, größere oder kleinere Mengen weißes Licht reflektieren. Je rauher also die Oberfläche eines Körpers ist, desto mehr weißes Licht ist der Farbe, die er im auffallenden Lichte zeigt, beigemengt, desto weniger intensiv kann sie somit sein. Vermindern dieser Reflexionen durch Poliren oder dadurch, daß man die Oberfläche mit einer glatten Schicht überzieht, deren Brechungsvermögen das vollständige Eindringen des auffallenden Lichtes erlaubt, wird also die Farbe des Körpers intensiver machen. Das letztere erreicht man leicht, wenn man den Körper mit einer Wasser- oder Firnisschicht bedeckt. Dies ist der Grund, warum die Farbe von Steinen beim Naßwerden eine viel intensivere wird, weshalb die Farben eines Ölgemäldes nach dem Firnissen viel lebendiger hervortreten. Gleichzeitig erhalten dieselben dadurch ihren Glanz, der nach Dove entsteht, indem die glatte Schicht für sich weißes Licht reflektiert, welches sich aber nicht mit den von den Oberflächen reflektierten Farben vermischt. Der Glanz stört zwar vielfach bei der Betrachtung eines Ölgemäldes, man nimmt aber diesen Nachteil mit in den Kauf, da er gleichzeitig den Farben Leben verleiht.

Die undurchsichtigen farbigen Körper nehmen also in dünnen Schichten nur eine Scheidung des Lichtes vor, während die durchsichtigen stets einen Teil des Lichtes zugleich absorbieren. Hiervon machen die grünen Blätter eine Ausnahme, da sie im durchgelassenen und im reflektierten Lichte die nämliche Absorptionsfarbe des Chlorophylls zeigen. Die Ausnahme ist aber nur scheinbar. Die mikroskopische Betrachtung der Blätter zeigt nämlich, daß die färbende Substanz als lauter kleine Körnchen in die das Blatt zusammensetzenden Zellen eingelagert ist, es kommt also auch bei auffallendem Lichte von den Blättern nur Licht in das Auge, welches in ihr Inneres eingedrungen, dort an den Grenzen der Zellen ꝛc. reflektiert und somit durch

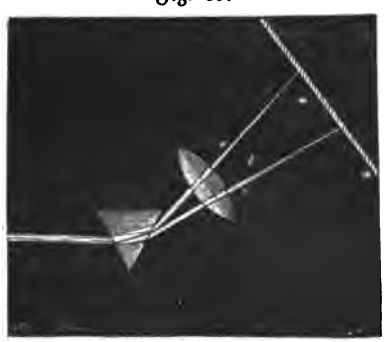
Chlorophyll gegangen sein muß. Daß die Blätter in dem roten Lichte der untergehenden Sonne bräunlich aussehen, im ebenfalls rötlichen Lampenlicht dagegen intensiv grün, erklärt sich leicht, wenn man bedenkt, daß jenes Licht vor allem Strahlen geringster Brechbarkeit enthält, sein Spektrum also nur nach der violetten Seite hin stark verkürzt ist, diesem dagegen die brechbarsten und wenigst brechbaren Strahlen zugleich fehlen. Das rote Sonnenlicht läßt also das rote Absorptionslicht des Chlorophylls ungeschwächt bestehen, während das grüne sehr geschwächt ist, das rötliche Lampenlicht dagegen verhält sich gerade umgekehrt.

Besteht ein Körper aus einer großen Menge kleiner Teilchen mit glatter Oberfläche, so werden an dieser eine große Menge Reflexionen eintreten und somit nur ein kleiner Teil des auffallenden Lichtes auf ganz unregelmäßigen Bahnen durch sie hindurch gelangen. Dadurch werden sie einmal verhindern, daß die Form des sie beleuchtenden Körpers durch sie hindurch gesehen werden kann, sodann aber auch nie so hell erscheinen können, wie diese. Sie erscheinen, wenn sie viel Licht durchlassen, wie ein Milchglasschirm, der aus kleinen Teilchen eines anderen Körpers besteht, welche sich in der Glasmasse befinden, weiß, oder wenn weniger Licht hindurch geht wie es bei Wolken der Fall ist, welche aus einer Menge in Luft schwebender Wassertropfen oder Eisnädelchen bestehen, grau, das endlich zu Schwarz werden kann, wenn die Schicht vermöge ihrer großen Dicke alles Licht zurückhält. Sehr stark reflektieren sie dagegen das auf sie fallende Licht, und so erklärt es sich, daß eine Gewitterwolke von unten gesehen schwarzgrau erscheint, während sie im auffallenden Lichte mit der blendend weißen Farbe des Schnees wetteifert. Auf die Farbe des das Licht durchlassenden Körpers kommt es dabei wenig an. Deshalb erscheint jede zu Schaum zerschlagene Flüssigkeit ebenso weiß, wie reines schäumendes Wasser, Schnee, Glaspulver, feiner Quarzsand 2c.

Absorptionsfarben der Gase und Dämpfe. Spektralanalyse.

Außer den festen und flüssigen Körpern können aber auch Gase und Dämpfe Absorptionsfarben zeigen. Die hierbei auftretenden Erscheinungen sind aber mit den bisher von uns angewandten Methoden der Herstellung eines Spektrums nicht genügend genau zu beobachten. Dabei ließen wir Licht, welches durch einen mäßig engen Spalt gegangen war, durch ein Prisma in seine Farben zerlegen und fingen diese auf einem Schirme auf. Da aber auf demselben eine jede Farbe eine gewisse, wenn auch geringe Breite haben muß, so kann an keiner Stelle des so entstehenden Spektrums nur eine Farbe allein auftreten, sie wird vielmehr von benachbarten Farben stets überdeckt sein. Wollte man dies vermeiden, ein reines Spektrum durch genügende Verengerung des Spaltes hervorrufen, so würde man an der großen Schwierigkeit der Herstellung eines so genauen Spaltes ebenso scheitern, wie an der Lichtschwäche des dadurch erhaltenen Spektrums. Bei mäßig engem Spalte erreicht man aber nun den gewünschten Zweck, wenn man nahe hinter dem Prisma eine Sammellinse aufstellt und den Schirm in solche Entfernung rückt, daß bei allein eingeschalteter Linse und in gerader Richtung fortgehenden Strahlen ein scharfes Bild des Spaltes auf ihm entstehen würde. Wird dann, wie Fig. 89 im Grundriß zeigt, das Prisma dazwischen gestellt und werden darauf Linse und Schirm in die richtige Lage gebracht, so entwirft die Linse nunmehr auf dem Schirm die Bilder des Spaltes in den verschiedenen Farben,

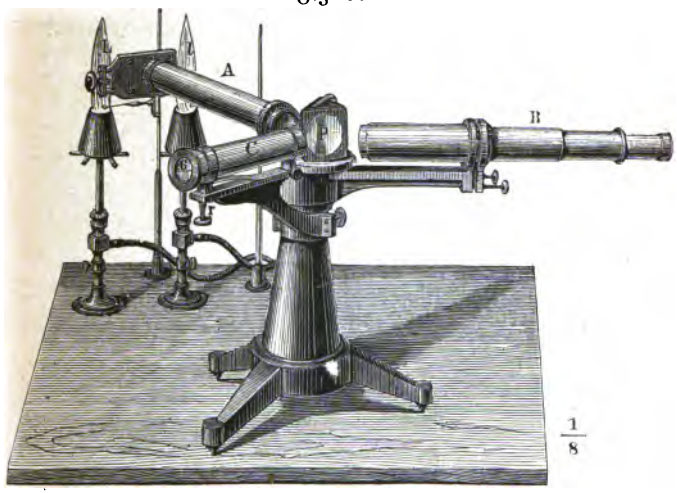
Fig. 89.



die aber, da sie eine ganz unmerkliche Breite haben, einander nicht mehr überdecken. In der Figur ist der Gang der roten und violetten Strahlen dargestellt. Das so erhaltene lichtstarke und reine Spektrum zeichnet sich durch intensive und satte Farben vor dem früher erhaltenen aus.

So bequem nun diese Anordnung des Versuches auch ist, wenn es sich darum handelt einer größeren Anzahl von Personen das reine Spektrum zu zeigen, so wenig zweckmäßig ist sie,

Fig. 90.

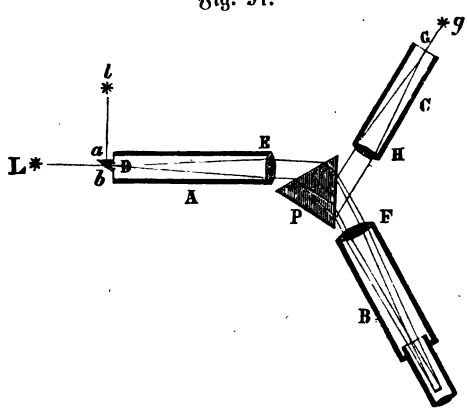


wenn ein einzelner Beobachter dasselbe zu studieren wünscht, einmal, weil man das Licht immer in ein dunkles Zimmer leiten muß, und dann hauptsächlich, weil das Spektrum an Schärfe doch immer noch zu wünschen übrig läßt. Diesen Übelständen hilft der in Fig. 90 in seiner äußeren Erscheinung und in perspektivischer Ansicht, in Fig. 91 in seiner inneren Einrichtung und im Grundriß dargestellte Apparat, das Spektroskop, vollständig ab. Dasselbe besteht aus einem Prisma, welches auf einem runden Metalltischchen so aufgestellt ist, daß seine brechende Kante

LIBRARY OF THE

senkrecht steht. An dem Tischchen sind drei Rohre aus Messing befestigt. Das eine derselben, das Spaltrohr A, trägt an der vom Prisma abgewandten Seite einen engen Spalt D, der ihm zugewandten eine Sammellinse E, das andere B ist ein astronomisches Fernrohr, in dessen Okular das Auge blickt. Die Linse des Spaltrohrs ist so gestellt, daß der Spalt sich in ihrem ersten Hauptbrennpunkte befindet; sie macht also die von demselben ausgehenden Strahlen parallel. Diese fallen nun auf das Prisma und werden hier gebrochen, aber verschieden stark, und es gehen

Fig. 91.



somit die Strahlen einer Farbe parallel weiter, die Strahlen verschiedener Farben aber sämtlich in etwas anderer Richtung. So fallen sie auf das Objektiv F des Fernrohrs und dies entwirft in seinem Brennpunkte neben einander linienförmige, aber sehr kleine Bilder des Spaltes in den verschiedenen Farben des Spektrums, ruft also in seinem Brennpunkt ein reines Spektrum hervor. Das Okular vergrößert dann nur dies Spektrum wieder. Um die einzelnen Teile desselben oder diejenigen verschiedener Spektra mit einander vergleichen zu können, ist der Fläche des Prismas, aus der die Strahlen austreten, schräg gegenüber

ein drittes Rohr, das Skalenrohr C aufgestellt, welches an seinem Ende G eine photographierte sehr kleine transparente Skala trägt, die durch ein davor gestelltes Licht g beleuchtet wird. Die von ihr ausgehenden Strahlen macht die Linse H parallel, sie wer-

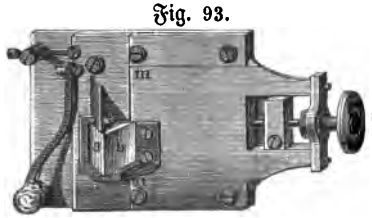
Fig. 92.

den dann von der dem Objektiv zugewendeten Prismenfläche reflektiert und von diesem ebenfalls in dem Brennpunkte zu einem sehr kleinen Bilde der Skala wieder vereinigt, welches auf dem Spektrum erscheint. Die Einrichtung des Spaltes zeigt die

Figur 93. Er wird durch zwei Schneiden gebildet, von denen die eine mn durch die Schraube S verschiebbar ist. Dadurch kann er erweitert und verengert werden. Vor ihm ist ein kleines Glasprisma ab, das Vergleichsprisma, so aufgestellt, daß es den Spalt zur Hälfte verdeckt und daß ein durch die Fläche a einfallender Strahl an der Fläche b in der Richtung der Spaltrohrachse total reflektiert wird. Dies kann auf zweierlei Art geschehen, wie die Fig. 93 und Fig. 91 zeigen. Fig. 92 giebt ein Bild von der Art, wie die Beobachtuugen im dunklen Zimmer angestellt werden.

Stellt man nun zwei Lichtquellen, L und l, so auf, wie Fig. 90 zeigt, so werden die Strahlen der letzteren in das Spaltrohr total reflektiert, während die der ersteren direkt eindringen. Das in das Fernrohr blickende Auge sieht dann in dem Gesichtsfelde desselben die von beiden Lichtquellen entworfenen Spektren übereinander liegen.

Fig. 93.



Als nun Brewster vor den Spalt dieses Instrumentes, dem wir die wichtigsten Bereicherungen unserer Kenntnisse in den letzten zwanzig Jahren verdanken, ein Röhrchen mit salpetrigsauren Dämpfen stellte und denselben mit Lampenlicht beleuchtete, so erhielt er ein Spektrum, welches von einer Menge feiner dem Spalte paralleler Linien durchzogen war. Ein ähnliches Verhalten zeigten Brom- und Joddampf. Die drei Spektren unterschieden sich nur dadurch, daß die Linien in verschiedenen Farben ungleich dicht lagen. Bei Entfernung der Röhrchen zeigte sich ein ganz kontinuirliches Spektrum. An den Stellen, an denen die dunklen Linien auftraten, fehlte also das Licht, es lagen auch hier Absorptionsspektren vor, die aber im Gegensatz zu den Bandenspektren Linienspektren genannt werden mußten, da anstatt der Absorptionsbanden nur Absorptionslinien in ihnen

auftraten. Diese an sich interessante, aber keineswegs wichtige neue Aufschlüsse gewährende Erscheinung gewann aber ein hohes Interesse, als sie mit anderen zusammengehalten wurde, die man an den vielfach in der Feuerwerkerei verwendeten gefärbten Flammen beobachtet hatte. Betrachtete man das von ihnen ausgesandte Licht durch das Spektroskop, so erhielt man Spektren, die je nach der Farbe der Flammen eine Anzahl farbiger Linien enthielten, also gleichsam die Umkehrung der von Brewster entdeckten Spektren darstellten. Nun entdeckten im Jahre 1862 Bunsen und Kirchhoff*), daß die Lage dieser Linien eine bestimmte war für jeden Stoff, der die Flamme färbte. Untersuchungen anderer zu diesem Zweck hergestellter Flammen zeigten dasselbe, und so zogen die genannten Forscher den Schluß, daß man das Spektroskop zur Erkennung der die Flammen färbenden Körper benutzen könne. Hiermit war die neue Beobachtungsmethode der Spektralanalyse gefunden, die sich später als geeignet erwies, auch die stoffliche Natur der Himmelskörper zu ergründen, vorausgesetzt, daß von denselben gefärbtes Licht zu uns kommt.

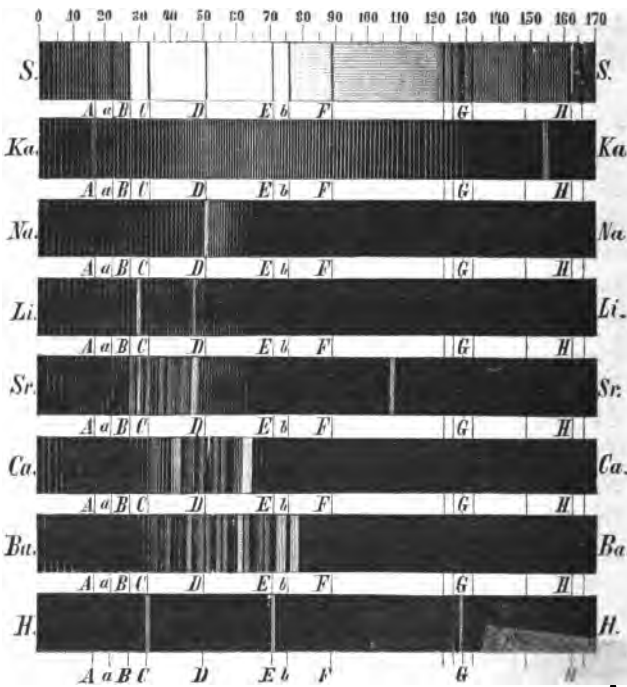
Ehe wir diesen Untersuchungen näher treten können, haben wir zunächst die Methode etwas genauer zu betrachten.

Man wußte bereits längst in der Feuerwerkerei, daß zum Färben der Flammen verschiedene chemische Grundstoffe dem Pulversatz beigemengt sein mußten, und daß sie aus der Verbindung, in der man sie verwendete, auf die Färbung der Flamme nur insofern einen Einfluß auszuüben imstande seien, als die eine Verbindung in der Hitze der Flamme flüchtiger als die andere ist. Diese Grundstoffe sind durchweg Metalle, von den Verbindungen derselben sind aber im allgemeinen diejenigen mit Chlor die flüchtigsten. Bunsen und Kirchhoff erhielten demgemäß für ihre Untersuchungen der Spektren von glühenden

*) Gust. Rob. K., geb. 1824 in Königsberg, war erst Prof. in Breslau, dann in Heidelberg, ist jetzt Prof. in Berlin.

Metalldämpfen passende Lichtquellen, indem sie in die nicht leuchtende, aber sehr heiße Flamme eines Bunsen'schen Brenners mittelst eines zu einer Öse gebogenen Platindrahtes eine Perle der Chlorverbindung des zu untersuchenden Metalles brachten. Die Flamme zeigte dann eine mehr oder weniger intensive

Fig. 94.



Färbung und, wenn man sie mit dem Spektroskop betrachtete, Spektren, welche nur aus leuchtenden Linien bestanden. Die Spektren von verschiedenen Salzen, die Bunsen und Kirchhoff untersuchten, zeigt Fig. 94. Die Spektren der Elemente sind mit ihren in Klammer beigesetzten chemischen

Symbolen bezeichnet: Kalium (Ka), Natrium (Na), Lithium (Li) Strontium (Sr), Calcium (Ca) und Baryum (Ba). Die Farbe der Linien ergiebt sich aus der Abbildung, wenn man die Lage der Linien mit der senkrecht darüber befindlichen des als obersten gezeichneten Sonnenspektrums vergleicht. Das Rot desselben geht etwa bis 35 der darüber gezeichneten Skala, das Orange bis 45, das Gelb bis 55, das Grün bis 70, Blau bis 110, Indigo bis 140 und Violett bis 170, doch geht dieses ganz successive in Dunkelheit über.

Die Skala ist ganz willkürlich; es ist diejenige, welche Bunsen in seinem Apparate anbrachte. Da Steinheil*) ein sehr einfaches Mittel angegeben hat, die Skalen anderer Instrumente auf die von Bunsen mit Hilfe der beobachteten Linien selbst zurückzuführen, so hat man nur die Natriumlinie, sowie dies Bunsen that, durch Drehung des Skalenrohrs auf 50 zu stellen und kann dann die Ablesungen eines jeden Spektroskops so angeben, wie sie Bunsen erhalten haben würde. Die Farbe, die die angeführten Körper der Flamme erteilen, hängt von der Lage der hellsten Linien ab. So färbt sie Kalium violett, Natrium gelb, Lithium tief rot, Strontium gelblich rot, Calcium orange, Baryum grün. Strontium und Baryum verwendet man deshalb in der Feuerwerkerei zu Rot- und Grünfeuer.

Bei diesen ersten Untersuchungen fiel den Heidelberger Professoren nun sofort auf, welcher enormen Empfindlichkeit die Spektralanalyse fähig ist, d. h. welche unglaublich kleine Mengen des betreffenden Stoffes sich mit Sicherheit durch die der Flamme erteilte Färbung nachweisen ließen. Das Natrium übertrifft in dieser Hinsicht die sämtlichen andern Stoffe. Zwei Millionstel Milligramm Natrium in die Flamme des Bunsen'schen Brenners gebracht, gaben noch kräftig die dieses Metall charakterisierende gelbe Linie;

*) Karl Aug. St., geb. 1801 in Rappoltsweiler, war erst Professor in München, dann im österreichischen, später im bairischen Ministerium als technischer Rat angestellt. Er starb 1870 in München.

um Lithium sicher wahrzunehmen, mußte die Flamme 0,000009 mgr, für Strontium und Calcium 0,00006 mgr enthalten. Die Kalium- und Baryumreaktion ist dagegen viel weniger empfindlich; zu der Erkennung dieser Stoffe sind 0,001 mgr erforderlich.

Die neue Methode bewährte sich nun sofort dadurch, daß Bunsen mit ihrer Hilfe zwei neue Metalle, Rubidium und Cäsium, in verschiedenen Mineralquellen entdeckte, die bisher den jene Wasser analysierenden Chemikern entgangen waren, da sie nur in äußerst geringen Mengen darin vorhanden sind. Mußte doch Bunsen, um sie in nennenswerter Quantität zu erhalten, 44000 kg des Dürkheimer Mineralwassers eindampfen lassen. Dieser Entdeckung folgten die dreier anderen Metalle, die den Namen des Thallium, Indium und Gallium erhalten haben. Interessanter noch, als die Entdeckung dieser sehr seltenen Körper, war der Nachweis der geradezu unglaublichen Verbreitung des Natriums, das sich in Spuren, man darf wohl sagen überall, findet. Namentlich scheint es stets im Staube vorhanden zu sein und man braucht nur ein bestaubtes Buch in der Nähe einer brennenden Spirituslampe auszuklopfen, um die Flamme derselben sofort intensiv gelb werden zu sehen. Vermutlich verdankt es diese Verbreitung den aus dem Meere aufsteigenden Wasserdünsten, welche Salzteilchen mitreißen, die dann von der bewegten Luft fortgetragen werden und im Regen wieder herabfallen. Die chemische Analyse freilich hatte diesen Salzgehalt des Regenwassers nicht nachweisen können. Man muß sich deshalb wohl hüten, bei spektralanalytischen Versuchen Staub zu erregen, da man alsdann die Natriumlinie nicht wieder los wird.

Glücklicherweise ist dies für die betreffenden Versuche kein großer Nachteil, da das Licht der Natriumflamme homogen ist, was sich spektroskopisch darin ausspricht, daß ihr Spektrum nur aus einer Linie besteht. Aus diesem Umstand erklärt es sich zunächst, daß ein Gesicht, welches von einer Natriumflamme (die man leicht erhält, wenn man den Docht einer Spirituslampe mit Kochsalz einreibt) beleuchtet wird, wie das Antlitz eines

Toten aussieht. Die rote Farbe des Blutes erscheint alsdann dunkel, als ob es geronnen wäre. Es erklärt sich aber auch daraus, daß die Natriumflamme auf die Entdeckung führte, wie man ein helles Spektrum umkehren kann; man hat eben nur, wie Kirchhoff fand, die Natriumflamme vor den Spalt eines Spektroskops zu stellen, welches durch Kalklicht oder durch elektrisches Licht beleuchtet wird, und erhält dann ein helles Spektrum, welches an der Stelle, wo die allein den Spalt beleuchtende Natriumflamme eine helle Linie hervorrufen würde, eine dunkle Linie zeigt. Diese Beobachtung führte Kirchhoff zunächst auf ein Gesetz, welches auf den vorliegenden Fall angewendet sich dahin aussprechen läßt, daß eine jede Flamme auf die Strahlen von der Brechbarkeit derer, die sie selbst aussendet, eine Absorption ausübt, während sie alle anderen Strahlen unverändert durchläßt. Die allgemeine Form dieses Gesetzes werden wir später bei Betrachtung der Wärmelehre geben. Hier sei nur der Versuch vorgeführt, mit dessen Hilfe Bunsen das Gesetz bewies. Er ging davon aus, daß wenn zwei gleich heiße, also auch gleich helle Natriumflammen hinter einander aufgestellt werden, eine jede das auf sie fallende Licht der andern absorbiert. Da sie aber auch gleichzeitig Licht von derselben Helligkeit aussenden, so wird die Helligkeit einer jeden Flamme ungeändert bleiben, wenn man sie auch so betrachtet, daß die andere ihren Hintergrund bildet. Ist dagegen die eine Flamme kühler als die andere, so erscheint sie vor dieser dunkel, da sie alles Licht, was von jener ausgeht, absorbiert. Zwei Flammen, welche den nötigen Temperaturunterschied zeigen, stellt nun Bunsen mit dem Apparat Fig. 95 her. In den beiden verkorkten Flaschen a und b befindet sich käufliches Zink, welches mit einer Mischung von verdünnter Schwefelsäure und Kochsalzlösung übergossen ist. Die Schwefelsäure verbindet sich mit dem Zink und der dabei aufsteigende Wasserstoff tritt Kochsalzlösung mitreißend in den oberen Teil der Flasche. Hier mischt er sich mit Leuchtgas, welches durch ein den Stopfen durchsetzendes, rechtwinklig ge-

bogenes Glasrohr eindringt. Das Gasgemisch aber gelangt durch ein weiteres den Stopfen durchsetzendes Rohr in den Brenner. Bei der einen Flasche derselben mündet nun dies

Fig. 95.

Rohr unter dem Blechmantel e f, der oben bei f einen schmalen bogenförmigen Spalt hat, unten bei e aber cylindrisch ist. In diesem Blechmantel erfolgt eine weitere Mengung des Gases mit

Luft. Dadurch ist die über f in einer fächerförmig ausgebreiteten Flamme stattfindende Verbrennung eine sehr vollständige, die Flamme selbst also sehr heiß und in der Farbe der Natriumflamme leuchtend. Das Gas der zweiten Fläsche b dagegen tritt durch c in das oben und unten offene Rohr k unter den Schornstein d, der oben durch einen Deckel mit mäßig großer Öffnung abgeschlossen ist. Da es sich bei c schon einigermaßen mit Luft gemengt hat, so findet zunächst in d eine nur unvollkommene Verbrennung statt und das zum Teil verbrannte Gasgemisch verbrennt erst oberhalb des Deckels vollständig. Die hier entstehende spitze Flamme ist aber viel kühler als die Flamme g. Vor diese gestellt, absorbiert sie somit alle von derselben auf sie fallenden Strahlen und erscheint wie schwarzer Rauch vor ihr. Die beiden Glastrichter dienen zur Erneuerung der Schwefelsäure. Es ist übrigens nicht nötig zwei Flaschen zu nehmen, man kann auch beide Brenner nebst den erforderlichen Röhren auf einer einzigen Flasche anbringen.

Da nun weißes Licht auch Licht von der Farbe der Natriumflamme enthält, so ist klar, daß eine vor solchem brennende derartige Flamme entweder heller oder dunkler sein kann als das Licht ihrer Farbe im weißen Licht, oder endlich gleiche Helligkeit wie jenes besitzen. Bringt man demnach beide vor den Spalt des Spektroskops, so daß das weiße Licht durch die Natriumflamme fällt, so wird die Natriumlinie entweder als helle oder dunkle Linie auf dem Spektrum erscheinen, oder sie wird gar nicht sichtbar werden, wie es der Kirchhoff'sche Satz verlangt.

Ganz ebenso, wie die Natriumflamme verhalten sich nun die durch andere Körper gefärbten Flammen auch. Hat ihr Spektrum mehr Linien, so erscheint, wenn man sie zwischen ein weißes Licht und den Spalt des Spektroskops stellt, in diesem ein Spektrum, welches von einer Anzahl dunkeler Linien durchzogen ist.

Außer den angeführten Metallen giebt es noch eine große Zahl, deren Salze nicht so flüchtig sind, daß sie in der Flamme

des Bunsen'schen Brenners verdampft werden könnten. Dies geschieht erst bei viel höheren Temperaturen und man muß deshalb, um ihre Spektren zu erhalten, eine andere Methode anwenden. Man läßt zu diesem Behufe zwischen zwei aus ihnen gebildeten stumpfen Drähten einen elektrischen Funken überschlagen, dessen Hitze so groß ist, daß er auch die am schwersten schmelzbaren Metalle verdampft. Der so entstehende Funken zeigt dann je nach der Substanz der Drähte, zwischen denen er überspringt, eine andere Farbe und demgemäß erhält man, wenn man den Spalt des Spektroskops durch den Funken beleuchten läßt, ein Linienspektrum, welches für jedes Metall ein anderes ist. Von diesen Spektren sind einige von Kirchhoff untersucht, seine Untersuchungen sind später von Huggins*) wiederholt und auf die der andern Metalle ausgedehnt worden. Die Spektren derselben bestehen sämtlich aus einer großen Menge von hellen Linien, die in allen Farben auftreten können; das Eisenspektrum z. B. enthält über 500 solcher Linien.

Diese bei der Temperatur des elektrischen Funkens erhaltenen Linien unterscheiden sich nun von denjenigen, welche man in der Flamme des Bunsen'schen Brenners erhält, auf den ersten Blick durch ihre Schärfe. Sie gehen nie in so verhältnismäßig breite Lichtbänder über, wie solche sich bei den letzteren vielfach finden. Es lag deshalb nahe, die von Bunsen und Kirchhoff gemachte Voraussetzung zu prüfen, ob die beobachteten Spektren nicht den Verbindungen, in denen die Metalle der Untersuchung unterworfen werden, zukommen, anstatt daß nach der Annahme der beiden Forscher in der Hitze der Flamme diese Verbindungen zersetzt würden und demnach das Spektrum dem Metall allein seine Entstehung verdanke. In dieser Richtung angestellte Untersuchungen haben ergeben, daß sich dies in vielen, aber durchaus nicht in allen Fällen so verhält. Namentlich zeigten dieselben,

*) William H., geb. 1824 in London, lebt als Privatmann und besitzt eine Sternwarte in Upper Tulse Hill.

daß diejenigen Spektren, die reich an breiteren Lichtbändern sind, nicht den Metallen, sondern deren Verbindungen angehörten. Es kommt eben darauf an, ob die Verbindung zersetzt wird. So fand man, daß die Spektren, welche in Fig. 94 als Calcium-, Strontium- und Baryumspektren bezeichnet sind, von den Verbindungen dieser Stoffe herrühren, daß dagegen die den zugehörigen Linienspektren auftreten, wenn ihre Verbindungen durch die Hitze des elektrischen Funkens zersetzt werden. Die Verbindungen zweier oder mehrerer Körper können also auch eigene Spektren haben; man beobachtet dieselben aber verhältnismäßig selten, weil sie bei den Temperaturen, die nötig sind, um diese Verbindungen zu verdampfen und ihre Dämpfe glühend zu machen, meistens zerstört werden.

Fig. 96.

Übrigens verändern sich auch die Spektren der Metalle mit der Temperatur. So tritt z. B. bei hoher Temperatur im Lithiumspektrum neben den Linien im Rot und Gelb noch eine dritte sehr helle Linie im Blau auf. Ebenso bringt der verschiedene Druck, unter dem die den Körper enthaltende Flamme brennt, Änderungen im Spektrum hervor.

Obwohl nun die Untersuchungen über diese Änderungen noch keineswegs abgeschlossen sind, so sind die Resultate der Analyse mit Hilfe des Spektroskops doch vollständig sicher, denn die Thatsache bleibt bestehen, daß das Dasein einer oder einiger Linien im Spektrum einen in die Flamme des Bunsen'schen Brenners gebrachten Körper mit Sicherheit anzeigt.

Die bisher vorgeführten Methoden sind nun aber nur

bei solchen Körpern anzuwenden, welche in der Hitze des Bunsen'schen Brenners oder des elektrischen Funkens verdampfen. Die Spektren der Gase dagegen können im allgemeinen nicht in der Flamme untersucht werden, da sie nicht rein auftreten würden. Dies geht nur bei einigen Kohlenstoff enthaltenden, die andern erhitzt man besser mittelst des elektrischen Funkens in den Geißler'schen Röhren. In der Form, wie sie für die spektralanalytische Untersuchung am besten verwendet werden, bestehen dieselben, Fig. 96, aus zwei kurzen Glasrohrstücken von etwa 1 cm Weite, die durch ein dickwandiges kapillares Glasrohr mit einander in Verbindung stehen und in deren Enden je ein Platindraht eingeschmolzen ist, um die Elektricität einzuleiten. Ein kleiner zugeschmolzener seitlicher Rohransatz dient dazu, sie soweit dies wünschenswert ist, auszupumpen. Ursprünglich konstruiert, um zu zeigen, daß der leere Raum die Elektricität nicht leitet, zogen diese Röhrchen bald durch die Lichterscheinungen, die der elektrische Funken in ihnen hervorruft, wenn sie ein sehr verdünntes Gas enthalten, die Aufmerksamkeit auf sich und dienten nach Konstruktion des Spektroskopes ganz besonders dazu, die Gasspektren kennen lernen zu lassen.

Dieselben können sehr verschieden sein, je nach der Temperatur des Gases und dem Drucke, unter dem es steht. Bei sehr hohem Drucke und hoher Temperatur zeigen sie ein kontinuirliches Spektrum, bei niedrigeren Drucken ein Linienspektrum. Jenes hat Plücker*) ein Spektrum erster, dieses ein Spektrum zweiter Ordnung genannt. Das Linienspektrum des Stickstoffes ist besonders charakteristisch durch eine Anzahl dunklerer Banden im Blau und Violett, welche nach dem Rot scharf abgegrenzt sind, nach dem Violett hin nach und nach dunkler werden, so daß sie denselben Eindruck, wie die Kannelierungen von Säulen machen. Ein solches Spektrum heißt deshalb ein

*) Jul. Pl., geb. 1801 in Elberfeld, war folgeweise Prof. in Bonn, Berlin, Halle und wieder in Bonn, wo er 1868 starb.

kanneliertes Spektrum. Das Linienspektrum des Wasserstoffs (H) Fig. 94 unten zeigt drei Linien. Höchst merkwürdig und farbenprächtig, weil sehr viel helle Linien enthaltend, sind die Spektren der verschiedenen Verbindungen des Kohlenstoffs mit dem Wasserstoff und das des Cyangases. Dieses hat im Rot, Grün, Blau und Violett Gruppen heller Linien, jene namentlich drei nach dem Rot scharf begrenzte Liniengruppen im Gelbgrün, Grün und Blau.

Die Kohlenstoffspektren haben neuerdings in der Technik eine große Wichtigkeit erlangt bei der Bereitung von Gußstahl nach Bessemers Methode. Gußeisen wird zu Stahl, wenn man ihm einen Teil seines Kohlenstoffes entzieht. Um demnach Stahl zu bereiten, wird Gußeisen in einer feuerfesten Retorte geschmolzen und ein Luftstrom hindurchgetrieben, welcher den überschüssigen Kohlenstoff verbrennt. Dieser Verbrennungsprozeß muß genau zur richtigen Zeit unterbrochen werden, wenn der Stahl bei zu weit gehender Verbrennung nicht unschmelzbar und somit für das Eingießen in Formen untauglich werden oder bei nicht weit genug geförderter Verbrennung noch Gußeisen bleiben soll. Die aus der Retorte hervorbrechende Flamme hat nun eine ausgeprägte Farbe, die sich im Verlaufe des Prozesses ändert und an der geübte Arbeiter erkannten, wann es Zeit war, den Luftstrom abzuschließen. Mittelst des Spektroskops fand Roscoe*), daß Natrium, Kalium, Lithium, Eisen, Kohlenstoffverbindungen, Wasserstoff und Stickstoff in dieser Flamme glühen. Beobachtet man dieselbe mit dem Spektroskop während des ganzen Prozesses, so sieht man das Linienspektrum auf einmal in ein kontinuirliches Spektrum übergehen, während die Kohlenstofflinien verschwinden. Dies ist, da man durch die Erfahrung weiß, der Moment, wo der Luftzutritt unterbrochen werden muß, und das Spektroskop giebt also dem Techniker das Mittel an die Hand, gerade im richtigen Augenblick diese Unterbrechung zu bewirken.

*) Henry Enfield R., geb. 1833 in London, Prof. in Manchester.

Die Untersuchungen über die Spektren der Gase sind übrigens noch keineswegs abgeschlossen; man darf von der Fortführung derselben noch manche ungeahnte und überraschende Aufklärung erwarten.

Anwendung der Spektralanalyse zur Untersuchung der Gestirne.

Die Spektralanalyse war nun aber auch berufen, eine Anzahl Erscheinungen zu erklären, die vor ihrer Erfindung ganz dunkel geblieben waren. Stellt man ein reines Spektrum mit Prisma und Linse auf einem Schirme her, indem man den Spalt mit Sonnenlicht beleuchtet, so zeigt sich eine ganz unerwartete Erscheinung. Das Spektrum ist in der Weise, wie das mit S bezeichnete Spektrum der Fig. 94 zeigt, von schwarzen Linien durchzogen, die verschieden dunkel und breit das Spektrum parallel der Richtung des Spaltes durchziehen. Obwohl sie Wollaston*) schon 1802 zuerst gesehen hatte, so sind sie doch nach Fraunhofer**) genannt, da dieser sie als der erste genau maß und in der in der Figur gegebenen Reihenfolge mit den Buchstaben des großen lateinischen Alphabets bezeichnete. Es sind solcher Linien aber viel mehr vorhanden, als Fraunhofer benannt hat. Schon wenn man das Licht nur durch ein Prisma gehen läßt, sieht man weitere angedeutet; sie treten deutlicher hervor, wenn man durch Anwendung von zwei oder mehr Prismen, was im Spektroskop keine Schwierigkeiten hat, das Spektrum bedeutend verbreitert. Daß diese Linien das Fehlen von Strahlen gewisser Farben im Sonnenspektrum bedeuteten, lag auf der Hand, ja Fraunhofer beobachtete bereits, daß mit derjenigen dieser Linien, die er D nannte, die Natriumlinie zusammenfiel, aber eine Erklärung dieser ganz rätselhaften

*) William Hyde W., geb. 1766 zu East-Dereham, Norfolkshire, war erst Arzt, seit 1800 Privatmann in London, wo er 1828 starb.

**) Joseph Fr., geb. 1787 in Straubing, war Optiker, dann Teilnehmer des optischen Institutes in Benediktbeuern, nachher Direktor desselben und Professor in München, wohin das Institut verlegt wurde. Er starb in München 1826.

Thatsache, sowie eine ebensolche der Linien zu geben, war er nicht imstande. Auch diese war Kirchhoff vorbehalten. Das von ihm aufgestellte Gesetz gab sofort die Erklärung an die Hand, daß das Sonnenlicht, ehe es zu uns kommt, eine Atmosphäre von glühenden Dämpfen durchlaufen haben muß, daß die Fraunhofer'schen Linien also ebenso entstehen, wie die Linien des Brom- oder Joddampfes. Es fragte sich nun aber, wo man diese Dampfatmosphäre zu suchen habe.

Die Beobachtung, daß bei niedrigem Stande der Sonne und feuchter Luft mehr Fraunhofer'sche Linien sichtbar werden, als bei hohem Stande der Sonne und trockner Luft zu beobachten sind, bewog Brewster anzunehmen, daß die fehlenden Farben von der Atmosphäre absorbiert würden. Die Beobachtung bewies aber doch nur, daß eine Anzahl der Fraunhofer'schen Linien von der Absorption der Atmosphäre herrührten, und diese Annahme wurde von Ångström*) dadurch bestätigt, daß er bei Beobachtung des Sonnenspektrums bei einer äußerst niedrigen Temperatur (unter — 20°) eine Anzahl Linien nicht fand, die für gewöhnlich sichtbar sind, andere sich gegen ihr sonstiges Aussehen verändert zeigten. Auch forderte die Brewster'sche Ansicht, daß das Spektrum einer jeden Lichtflamme, die aus genügend weiter Entfernung beobachtet wird, die sämtlichen Fraunhofer'schen Linien zeigen müßte. Ein solches Spektrum zeigt aber überhaupt nur Linien, wenn die Luft sehr feucht ist, so hat sie Secchi in der feuchten Luft Roms beobachtet, und diese Linien sind allein die des Wasserdampfes. Sie liegen hauptsächlich im Gelb und Orange und können sich daselbst bei sehr feuchter Luft so häufen, daß man dunkle Absorptionsbanden zu sehen glaubt. Gerade die dunkelsten der Fraunhofer'schen Linien sind aber immer und unter allen Umständen sichtbar, sie müssen also, wie Fraunhofer auch bereits annahm, dem Sonnen-

*) Anders Jöns Å., geb. 1814 in Medelblad, war erst Observator in Upsala, dann Akademiker in Stockholm, wo er 1874 starb.

lichte selbst angehören. Dann aber erklärt sich ihre Entstehung am zwangloseſten durch die Annahme, daß der leuchtende Sonnenkern von einer Atmosphäre umgeben ist, welche die Stoffe in Dampfform enthält, deren Spektren helle Linien zeigen von einer Brechbarkeit, welche gleich derjenigen von dunkeln Linien im Sonnenspektrum ist. Von diesem Gedanken ausgehend, unternahm nun Kirchhoff eine genaue Vergleichung der Fraunhofer'schen Linien mit denen der uns bekannten irdischen Stoffe. Durch Anwendung einer Anzahl Prismen erhielt er eine ganz unglaubliche Vermehrung dieser Linien. Einzelne, wie die Natriumlinie, zerfielen in mehrere, eine große Menge schwächerer wurden sichtbar. Als er nun zuerst diese Linien des Sonnenspektrums und dann die mit demselben Apparat beobachteten Linien der chemischen Elemente in eine Skala eintrug, so ergab sich, daß mit wenigen Ausnahmen die Fraunhofer'schen Linien mit Linien in den Spektren der irdischen Stoffe koincidierten. Dieses Resultat forderte mithin die Annahme, daß in der die Sonne umgebenden Dampfatmosphäre Dämpfe solcher Stoffe vorhanden sein müssen, deren Spektrallinien mit Fraunhofer'schen dieselbe Brechbarkeit besaßen. Mit welcher erstaunlichen Exaktheit Kirchhoff diese Arbeit ausführte, zeigte sich später, als es gelang das Sonnenspektrum zu photographieren. Als Roscoe die Photographie mit Kirchhoffs Zeichnung verglich, kam ihm der Verdacht, nicht das Spektrum selbst, sondern die Zeichnung habe man photographiert, bis ihn die Auffindung kleiner Unterschiede in der Stärke der Linien von der Richtigkeit dieses Verdachtes überzeugte. Den so von Kirchhoff begonnenen Atlas des Sonnenspektrums hat dann Ångström vollendet.

Die Untersuchungen Kirchhoffs, Ångströms und anderer ergaben nun, daß von bekannten irdischen Körpern Natrium, Calcium, Baryum, Magnesium, Eisen, Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Strontium, Kobalt, Wasserstoff, Mangan und Aluminium in der Sonne vorkommen. Hierzu kam noch Sauerstoff, nachdem man gefunden hatte, daß über gewissen dunklen Stellen, die

die Sonnenscheibe öfters zeigt, den Sonnenflecken, Wasserdämpfe schwebten. Da nun Kirchhoff fürchtete, daß das Beginnen, eine chemischen Analyse der Sonne von der Erde aus zu unternehmen, als ein allzu kühnes Wagnis verurteilt werden würde, berechnete er den Grad der Wahrscheinlichkeit, der seinen Resultaten zugesprochen werden müßte. Er hatte die Koincidenz von 60 Eisenlinien mit Fraunhoferschen Linien beobachtet, die Wahrscheinlichkeit, daß man daraus auf das Vorkommen von Eisendämpfen in der Sonnenatmosphäre schließen dürfe, ergiebt sich so als groß, daß man mit gleichen Chancen auf Gewinn eine Trillion gegen Eins wetten kann, daß die Sonne Eisen enthalte. Diese Wahrscheinlichkeit ist noch sehr gewachsen, seitdem Ångström die Koincidenz von 400 weiteren Eisenlinien auffand. Man wird deshalb behaupten dürfen, daß die Sicherheit, mit der wir das Vorhandensein von Eisendämpfen in der Sonnenatmosphäre annehmen dürfen, weitaus diejenige übersteigt, die wir sonst in den Naturwissenschaften als eine vollauf genügende anzunehmen gewohnt sind!

Untersucht man nun weiter, welchen Stoffen die dunkelsten der Fraunhofer'schen Linien ihre Entstehung verdanken, so ergiebt sich, daß C, F und h, eine sehr nahe bei G gelegene Linie, dem Wasserstoff, D dem Natrium, E und G, welche ganze Liniengruppen darstellen, zum Teil dem Eisen, G und H zum Teil dem Calcium angehören. A und B haben noch nicht erklärt werden können, es ist nicht unwahrscheinlich, daß sie Absorptionslinien unserer Atmosphäre sind. Einige Linien, welche sicher nicht den letztgenannten Ursprung haben, sind noch nicht mit Linien irdischer Stoffe zu identifizieren gewesen; doch darf man daraus nicht schließen, daß sie Stoffen zukommen müßten, welche die Erde nicht besitzt, da wir die Veränderungen der Spektren der Elemente bei den auf der Sonne herrschenden Drucken und Temperaturen noch nicht genügend kennen.

Weitere Aufschlüsse gab das Spektroskop, über die eigentümliche und wichtige Rolle, welche der Wasserstoff in der

Sonne spielt. So konnte Lockyer*) aus einer kleinen Verschiebung der Wasserstofflinien oder eines Teiles derselben nach dem einen oder anderen Ende des Spektrums schließen, daß in den Sonnenflecken der Wasserstoff entweder in wirbelnder Bewegung ist, oder daß er in der Mitte mit enormer Geschwindigkeit empor, an der Peripherie herabsteigt. Daß gewaltige Wasserstoffmassen bei Sonneneruptionen zu ungeheuern Höhen emporgeschleudert werden, wußte man längst, da man sie als Protuberanzen am Rande der Sonne öfters bei totalen Sonnenfinsternissen hatte erscheinen sehen. Seitdem nun Janssen, Lockyer und Zöllner**) Mittel angegeben, die Protuberanzen zu beliebiger Zeit sehen zu können, ist diese Ansicht dnrch genauere Beobachtungen nur bestätigt worden.

Die physikalische Beschaffenheit des Sonnenkörpers stellen sich die Forscher noch verschieden vor, doch hat die Annahme die meiste Wahrscheinlichkeit für sich, daß derselbe aus Gas von der höchsten Temperatur besteht, welches fortwährend Wärme abgiebt, indem die heißesten Teile an die Oberfläche steigen, dort relativ erkalten und nun wieder herabsinken. In regelmäßigen Zwischenräumen werden diese Bewegungen heftiger eruptiv und geben dann Veranlassung zur Bildung von Gaskratern, den Sonnenflecken. Der heiße Kern der Sonne, deren obere im Fernrohre sichtbare Schicht die Photosphäre heißt, ist weiter von einer kühleren Schicht, der Chromosphäre umgeben. Beim Durchgang durch diese findet die Absorption statt, welche die Fraunhofer'schen Linien verursacht und dem Sonnenlichte seine gelbliche Farbe erteilt. Die Chromosphäre aber wird endlich von einer noch kühleren Atmosphäre eingeschlossen, welche sich weit in den

---

*) Joseph Norman L., geb. 1836 in Rugby, wurde 1876 Sekretär der königl. Kommission für wissenschaftlichen Unterricht, 1871 Assistent Commissioner an der Universität Cambridge.

**) Joh. Karl Friedr. Z., geb. 1834 in Berlin, war Prof. in Leipzig wo er 1882 starb.

Weltenraum hinaus erstreckt und bei totalen Sonnenfinsternissen als Corona den Mond, wie die Glorie den Kopf des gemalten Heiligen, umgiebt.

Diese Hypothese ist durch die spektroskopischen Betrachtungen des Lichtes, welches andere Fixsterne aussenden, nur bestätigt worden. Man kann unter ihnen noch sehr heiße von weißer Farbe und einem Spektrum mit verhältnismäßig wenigen und zarten Absorptionslinien, von solchen, deren Spektrum mit dem der Sonne sehr nahe übereinkommt, und endlich von noch kühleren unterscheiden, deren rotes Licht durch viele und breite Absorptionslinien oder Banden bedingt wird. Das Spektrum der Nebelflecken hat bewiesen, daß diejenigen, welche auch bei den stärksten Vergrößerungen ihr nebelartiges Aussehen behalten, also nicht aufgelöst werden können, aus Gasen, namentlich Stickstoff bestehen, das der Kometen, daß der Schweif ebenfalls gasiger Natur ist und zwar meist aus Kohlenwasserstoff, dem sich in der Nähe der Sonne mehrmals Natrium zugesellt hat, gebildet wird. Da aber das Licht des Kernes polarisiert ist und im Spektroskop ein schwaches Sonnenspektrum neben den Banden des Leuchtgases entwirft, so müssen sie auch Sonnenlicht reflektieren. Alle Untersuchungen deuten darauf hin, daß sie aus Haufen von planetarischen Körpern, Meteoren bestehen und den Schweif infolge der verdampfenden, möglichenfalls auch elektrischen Kraft der Sonnenstrahlen erst in der Nähe von deren Quelle entwickeln, indem sie weitereilend ihn im Weltenraum zurücklassen. Das Licht des Mondes und der Planeten ist stets polarisiert, also reflektiert, einige der letzteren, namentlich Jupiter und Saturn, scheinen eine Atmosphäre zu besitzen, die die Sonnenstrahlen durchläßt, aber eine Absorptionsbande im Rot dabei hervorruft. Auch Venus scheint von einer Atmosphäre umgeben, welche aber so dicht ist, daß sie an ihrer Oberfläche das zu uns gelangende Sonnenlicht reflektiert.

Erklärung der Farben nach der Undulationshypothese. Interferenzfarben.

Die bisher von uns betrachteten Farbenerscheinungen sind diejenigen, die wir am häufigsten und leichtesten beobachten können. Wir wenden uns nun zunächst dazu, dieselben als Folgerungen der Wellentheorie des Lichtes darzustellen, um dann, indem wir die weiteren Konsequenzen aus dieser Annahme ziehen, den Kreis der Farbenerscheinungen durch solche zu vervollständigen, zu deren Herstellung mehr oder weniger komplizierte Vorrichtungen getroffen werden müssen.

Wir hatten behufs der Erklärung der Brechung des Lichtes uns die Lichtwelle unter dem Bild einer Reihe von Reitern vorgestellt, welche in schiefer Richtung über eine Wiesenfläche trabend an die Grenze eines geackerten Feldes gelangt und gerade, wie die Lichtwelle beim Übertritt aus einem dünnern in ein dichteres Medium, infolge der größeren Hindernisse, welche der Feldboden der Bewegung der Pferde entgegensetzt, die Richtung ihrer Fronte und damit ihres Fortschreitens ändert. Dehnen wir nun dieses Bild insofern aus, daß wir hintereinander zwei Reihen Reiter uns denken, die einen etwa Kürassiere mit möglichst großen und schweren Pferden, die anderen Husaren im Gegensatze dazu auf recht kleinen und leichten Tieren sitzend! Um mit derselben Geschwindigkeit auf der Wiesenfläche fortzukommen, müssen die kleinen Pferde rascher ausschreiten, so daß auf eine gewisse Anzahl Schritte der großen eine größere Anzahl Schritte der kleineren Pferde kommt. So lange die Beschaffenheit des Bodens keine wesentlichen Hindernisse darbietet, werden die kleinen Pferde leicht die Geschwindigkeit der großen inne halten können, sowie aber das Ausschreiten Hindernisse bietet, werden die großen Pferde den kleinen gegenüber sehr im Vorteil sein. Denn einmal müssen die letzteren mehr Schritte machen, werden also öfter diese Hindernisse zu überwinden haben als die großen, dann aber wird auch ihr kleineres Gewicht sie

Isaac Newton.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

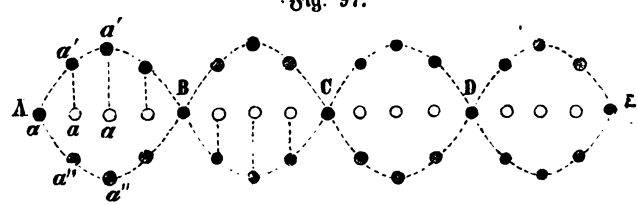
nicht wie die großen befähigen, einen Teil der Hindernisse einfach niederzutreten. Da nun die Größe der Schwenkung, die die einzelne Reihe erfährt, abhängt von der größeren oder geringeren Geschwindigkeit, mit der sie auf dem Ackerfelde fortschreiten kann, so muß die Kürassierreihe eine geringere Schwenkung erfahren als die Reihe der Husaren.

In dem Falle der großen Pferde sind nun die roten, in dem der kleineren die violetten Lichtwellen. Denn da die Geschwindigkeiten, mit denen sich das rote und das violette Licht fortbewegen, wie wir gesehen haben, gleich sind, so muß, ebenso wie die kleinen Pferde in derselben Zeit mehr Schritte machen als die großen, das violette Licht in derselben Zeit mehr Schwingungen vollführen als das rote. Seiner schnelleren Bewegung muß dann das dichtere widerstehende Mittel mehr Hindernisse entgegensetzen, gerade so wie ein Mensch, welcher einen aus dicht stehenden Bäumen gebildeten Wald rasch zu durchdringen sucht, von diesem mehr gehemmt wird als ein anderer, welcher den Wald langsam durchschreitet. Da wir nun unter Wellenlänge des Lichtes den Abstand zweier Lichtteilchen verstehen, von denen das eine gerade eine Schwingung vollendet hat, während das andere dieselbe beginnt, so müssen auf eine bestimmte Länge eines weißen Lichtstrahles mehr violette als rote Lichtwellen kommen und wir erhalten somit das Resultat, daß die größere Brechbarkeit eines Lichtstrahles von bestimmter Farbe ihre Ursache findet in seiner kleineren Wellenlänge. Mit der Zunahme der Brechbarkeit der Strahlen des Spektrums von rot bis violett, muß somit ihre Wellenlänge abnehmen.

Wenn nun auch ohne weiteres zuzugeben sein wird, daß die Erklärung der verschiedenen Brechbarkeit der Lichtstrahlen aus der verschiedenen Wellenlänge derselben, aus der Wellentheorie des Lichtes gefolgert werden muß, so würde es doch vom größten Werte sein, wenn durch Messung der Wellenlänge nicht nur das eben Abgehandelte bestätigt, sondern auch dadurch für die Wellentheorie des Lichtes selbst eine weitere wichtige Stütze gewonnen würde.

Dies ist nun von Fresnel wirklich geschehen. Der berühmte Gelehrte ging davon aus, daß wenn zwei gleiche Wellenbewegungen gleichzeitig an demselben Ätherteilchen anlangen, welches die eine in dem einen, die andere in dem entgegengesetzten Sinne zu bewegen bestrebt ist, das von beiden ergriffene Ätherteilchen in Ruhe bleiben muß. Stellen z. B. in Fig. 97 a, a, a .... die Ruhelagen einer Reihe von Ätherteilchen vor und würden dieselben vermöge des Impulses einer in A anlangenden Welle von der Länge AC = CE in einem bestimmten Moment die Lagen a, a', a' . . . , infolge des Impulses einer zweiten von der nämlichen Wellenlänge aber die Lagen a, a'' a'' . . . annehmen, so würden auf jedes Teilchen in demselben Augenblicke zwei gleich große Antriebe im entgegengesetzten Sinne wirken, dasselbe also in Ruhe

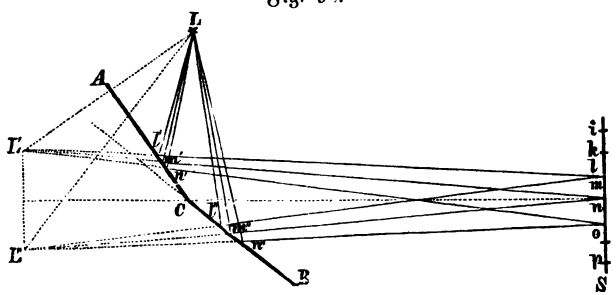
Fig. 97.



bleiben müssen, gerade so, wie ein Wagen, an welchen man vorn und hinten ein Pferd anspannt, nicht von der Stelle gezogen wird. Somit würde es also eine Folgerung der Wellentheorie sein, daß Licht zu Licht Dunkelheit gäbe. Um dies experimentell darzustellen, hätte man nur nötig zu bewirken, daß an demselben Punkte zwei Wellenbewegungen ankämen, welche sich in der nämlichen Richtung bewegten, von denen aber die eine der andern um eine halbe Wellenlänge voraus wäre. Denn man müßte die Welle a, a'', a'' . . . um AB, also um die Hälfte von AC zurückschieben, wenn beide Wellenbewegungen in ganz gleicher Weise das Ätherteilchen bei A angreifen sollten. Dasselbe würde übrigens stattfinden, wenn man die Welle a, a'', a'' . . . anstatt zurück vorwärts schöbe. In diesem Falle wäre die eine Welle

der andern um eine ganze Wellenlänge voraus. Sie würden aber in jedem Augenblicke einem Ätherteilchen a gleich große und gleich gerichtete Impulse mitteilen, sich also verstärken. Kommen somit zwei Wellen an dem nämlichen Punkte an, von denen die eine der andern gar nicht oder um zwei halbe Wellenlängen und dann ebenso um 4, 6 ꝛc. vorausgeeilt ist, so entsteht daselbst verstärktes Licht, ist die eine aber um, 1, 3, 5, 7 ꝛc. halbe Wellenlängen vorausgeeilt, so muß daselbst Dunkelheit entstehen. Es braucht dabei nicht besonders bemerkt zu werden, daß die Schwingungen zu denen beide anregen, in dieselbe Ebene fallen müssen.

Fig. 98.



Um nun diese sogenannten Interferenzerscheinungen experimentell darzustellen, verfuhr Fresnel folgendermaßen. Er nahm zwei kleine quadratische Spiegelchen aus schwarzem Glase, welches, zur Vermeidung störender Reflexionen an der Hinterfläche, kein Licht hindurchließ, schliff zwei Kanten derselben geradlinig ab und legte diese so genau gegeneinander, daß auch nicht der geringste Zwischenraum blieb. Darauf befestigte er sie so in Wachs, daß die Stoßkante senkrecht stand und die Spiegel eine geringe Neigung gegen einander hatten. In dieser Lage zeigt sie Fig. 98 im Grundriß als die Linien CB und AC. Vor sie stellte er einen von einem Licht beleuchteten engen Spalt L auf, von dem sie in L' und L'' Bilder entwarfen, so daß die auf S ankommenden reflektierten Strahlen von L' und L'' auszugehen schienen. Ist

nun m der Punkt auf dem Schirme S, von welchem L' und L" gleich weit entfernt sind, so kommen hier die von den übereinander liegenden Punkten von L ausgesandten und von den Spiegeln reflektierten Strahlen so an, daß sie in m Schwingungen nach derselben Seite erregen, also sich verstärken. Es wird mithin hier ein heller senkrechter Streifen entstehen. Nehmen wir nun an, daß das von L ausgehende Licht einfarbig sei, so werden beiderseits neben m zwei senkrechte Punktreihen l und n liegen von solcher Beschaffenheit, daß die zu ihnen gelangenden Strahlen Ll'l und Ll"l einerseits und Ln'n und Ln"n andererseits Wege zurückgelegt haben, deren Unterschied eine halbe Wellenlänge beträgt. Hier werden sich somit die Strahlen auslöschen, neben der hellen Mitte werden zwei dunkle Streifen n und l entstehen. Neben diesen befinden sich nun wieder zwei Punktreihen k, die so liegen, daß die Wegeunterschiede der hier ankommenden Strahlen eine ganze Wellenlänge betragen, die Streifen werden wieder hell erscheinen, da sie nach außen wiederum von zwei dunklen Streifen p und i begrenzt sind, die an den Stellen liegen, für welche der Wegeunterschied anderthalb Wellenlänge beträgt, und so fort. Man würde also zu beiden Seiten der hellen Mitte m abwechselnd dunkle und helle Streifen erhalten und diese würden sich beliebig weit von m fortsetzen, wenn sie nicht sehr bald so nahe aneinander zu liegen kämen, daß man sie nicht mehr unterscheiden kann. Mißt man nun den Abstand des Punktes L und des Schirmes S von der Mitte der Spiegel, sowie die Entfernungen mn, ml, no, lk ꝛc., so ist es mit Hilfe einiger einfachen trigonometrischen Sätze nicht schwer, die Wellenlänge der verschiedenen Farben zu finden. Fresnel fand sie für rotes Licht zu 0,000 645 mm, für violettes zu 0,000 406 mm, für das äußerste rot (braun) steigt sie bis zu 0,000 765 mm.

Läßt man anstatt einfarbigen Lichtes weißes Licht auf die Spiegel fallen, so entstehen durch die einzelnen Farben Systeme von dunkeln Streifen auf dem Schirme, die zum Teil auf einander fallen. Da aber wegen der Verschiedenheit der Wellenlängen

diese Streifen sämtlich verschiedene Abstände von m haben, so finden sich an allen Stellen alle Farben vor, mit Ausnahme einer einzigen, die hier ausgelöscht ist; die betreffende Stelle muß also in der Komplementärfarbe dieser fehlenden Farbe leuchten. Da nun die Farben ungleich hell sind, so muß die Komplementärfarbe der hellsten Strahlen des Spektrums, nämlich der gelben, dunkler erscheinen als alle andern und man erhält also bei Anwendung von weißem Lichte hellere und dunklere farbige Streifen. Übrigens gelingt dieser Versuch bei unpolarisiertem Lichte nur, wenn die Strahlen, die zur Interferenz kommen, von einer Lichtquelle ausgehen, denn nur dann kann die für das Eintreten der Erscheinung notwendige Bedingung, daß die zusammentreffenden Strahlen in derselben Ebene schwingen, verwirklicht sein. Nimmt man die Geschwindigkeit des Lichtes zu 41 500 Meilen oder 307 936 Millionen Millimeter in der Sekunde, so ergiebt sich, daß rotes Licht in dieser Zeit 402 Billionen, violettes dagegen 768 Billionen Schwingungen vollführt.

Farbige Streifen, welche den Interferenzstreifen Fresnels täuschend ähnlich sehen, erhält man auch in sehr dünnen durchsichtigen Häuten, deren Dicke nach einer Seite abnimmt. Diese kann man leicht herstellen, wenn man ein Trinkglas umgekehrt in Seifenwasser taucht, mit einer Seifenwasserhaut heraushebt und nun so hält, daß diese senkrecht zu stehen kommt. Die auf die Haut auffallenden Strahlen werden dann so gebrochen, wie dies Fig. 18 zeigt. Da aber die Strahlen, welche von der einen Seite der Haut reflektiert werden, mit solchen zusammentreffen, welche die doppelte Dicke der Haut durchlaufen haben, so müssen hier Strahlen zur Interferenz kommen, die einen Wegeunterschied von einer, anderthalb ꝛc. Wellenlänge haben, je nachdem die aus der Haut zurückkehrenden Strahlen größere oder kleinere Wege zurückgelegt haben. Da nun bei dem keilförmigen Querschnitt der Haut ihre Dicke nach einer Seite regelmäßig zunimmt, so müßten bei Beleuchtung mit homogenem Lichte an den Stellen, wo diese Dicke ein Viertel einer Wellenlänge beträgt,

also der längere Weg des die Haut in doppelter Dicke durchsetzenden Strahles einer halben Wellenlänge gleich sein muß, dunkle Streifen, an den Stellen dagegen, wo die Dicke dieser Haut einer halben Wellenlänge gleich wird, helle Streifen entstehen, welche in der Richtung, in der die Dicke der Haut dieselbe bleibt, sich erstrecken. Diese Erscheinung müßte dieselbe sein, einerlei, ob man das von der Haut reflektierte oder von ihr durchgelassene Licht betrachtete. In Wirklichkeit sieht man aber nur im durchgelassenen Lichte an den bezeichneten Stellen helle Streifen, während im reflektierten Lichte anstatt der hellen dunkle auftreten und umgekehrt. Das hat darin seinen Grund, daß jedesmal bei der Reflexion, die den Strahl veranlaßt, im optisch dichteren Mittel zurückzukehren, eine Verzögerung um eine halbe Wellenlänge eintritt, eine Erscheinung, welche ihren Grund in den verschiedenen Elasticitätsverhältnissen des Äthers in beiden Mitteln hat. Wendet man nun anstatt einfarbigen Lichtes weißes Licht an, so werden die Stellen, wo einzelne Farben helle und dunkle Streifen zeigen, an verschiedenen Orten liegen; es werden also die nämlichen farbigen Streifen auftreten müssen, wie bei den Fresnel'schen Spiegeln. Da aber jedesmal an der Stelle, wo eine Farbe im reflektierten Licht helle Streifen zeigt, im durchgelassenen dunkle Streifen auftreten, so müssen die Streifen im durchgelassenen Licht die komplementären Farben zeigen im Vergleich zu den Streifen im reflektierten Licht.

Hätte man nun anstatt einer keilförmigen Membran eine solche von gleich bleibender Dicke, so müßte diese einfarbig erscheinen und zwar in der Farbe, die in der keilförmigen Membran der Streifen an der Stelle zeigt, wo die Dicke derselben mit derjenigen der in Rede stehenden Membran genau überein kommt. Solche Häutchen bilden sich z. B., wenn man ein Stück stark erhitzten Stahles sich langsam an der Luft abkühlen läßt. Der Stahl läuft dann an, indem sich an seiner Oberfläche ein ganz dünnes Oxydhäutchen bildet. Je langsamer nun seine Abkühlung vor sich geht, desto weicher wird der Stahl, unterbricht man dieselbe

dadurch, daß man ihn plötzlich in kaltes Wasser taucht, so kann man ihm jede beliebige Härte geben, auf welche man aus der Farbe schließt, die das Oxydhäutchen ihm ertheilt hat. Auf diese Art kann man die Farbenänderung des Stahles zum Härten benutzen. Derartige Farben dünner Blättchen zeigen unter andern alte an der Oberfläche zersetzte Glasstückchen, ganz dünne Collodiummembrane, Seifenblasen ꝛc.

Betrachtet man nun die über ein Trinkglas gespannte Seifenwasserhaut genauer, nachdem der obere Teil derselben durch genügend langes Stehen möglichst dünne geworden ist, so sieht man, daß die Haut oben bläulichweiß, dann gelblichweiß erscheint. Hierauf folgt ein roter, dann ein dunkelpurpurner Streifen, auf diesen ein blauer u. s. w. Zuletzt wechseln nur rote und grüne Streifen ab, die immer schmaler und enger werden. Aus der bekannten Wellenlänge der fehlenden Farbe läßt sich nun an den betreffenden Stellen die Dicke der Membran berechnen. Ihre geringste Dicke, die sie da besitzt, wo sie eine bläulich weiße Farbe zeigt, ist zu 0,000 114 mm bestimmt worden.

Es versteht sich von selbst, daß nicht alle Stoffe geeignet sind, so dünne Häute zu bilden, wie es die Entstehung der vier ersten Farbenstreifen voraussetzt. Eine Wasserhaut z. B. wird nicht dünner, als daß sie das dem fünften Streifen angehörige Blau zeigt, bei noch größerer Dickenabnahme zerplatzt sie. Die Luft enthält nun immer Wasserdampf, der bei ihren wechselnden Temperaturverhältnissen oft genug in flüssiges Wasser übergehen muß. Dabei kann er sich aber nicht in ausgebreiteten Häuten niederschlagen, sondern nur in Vollkügelchen oder Bläschen. Aber auch in Vollkügelchen kann dies nicht geschehen, denn wenn solche in der Atmosphäre vorhanden wären, so könnte das Licht sich nicht durch sie hindurch in gerader Linie fortpflanzen. Die Wasserkügelchen müßten ja alle wie Prismen wirken und nur ein Strahl, der sie sämtlich central durchsetzte, würde in gerader Linie fortschreiten können, während die Bläschen das Licht ebenso ungebrochen durchlassen würden, wie dies die überall gleich-

dicken Fensterscheiben auch thun. Die dünnsten dieser Bläschen müssen nun, wenn sie nicht zerplatzen sollen, im reflektierten Licht blau aussehen, im durchgegangenen gelblich. Von allen Stellen des Himmels, die von dem jedesmaligen Stand der Sonne entfernter liegen, kann nur Licht in unser Auge kommen, welches an diesen Bläschen reflektiert, also blau ist. Wasserbläschen von dieser möglichst dünnen Wandstärke müssen aber immer in großer Menge vorhanden sein, da sie ja sich fortwährend auflösen und wieder entstehen. Dünnere Wandstärken können also überhaupt nicht vorkommen, die von den Bläschen mit dickeren Wandstärken hervorgerufenen Farben aber werden sich dem Blau beimengen. Je feuchter nun die Luft ist, desto mannigfaltiger werden die Wandstärken der vorhandenen Bläschen, desto mannigfaltiger werden also auch die durch Reflexion an ihnen entstandenen Farben sein; das Blau wird sich dann dem Weiß mehr nähern, der Himmel muß in solchem Falle, also z. B. vor Eintritt von Regenwetter weißlichblau erscheinen. Trockenheit der Luft bei Freiheit von Staub läßt ihn schwarzblau aussehen, diese Trockenheit schließt aber großen Gehalt an Wasserdampf durchaus nicht aus, sondern nur das Vorhandensein von Bläschen, die aus flüssigem Wasser bestehen. Bei tiefem Stande der Sonne wird, wenn wir nach ihr hin sehen, nur Licht in unser Auge gelangen, welches durch Bläschen hindurchgegangen ist und zwar durch solche von großer Wanddicke, weil sie der Erde näheren Luftschichten angehören. Der Himmel wird also in einer Farbe erscheinen, welche nahezu komplementär dem Himmelblau ist, in der gelbroten Farbe des Abend- und Morgenrotes.

In der angegebenen Weise erklären sich die Farbenerscheinungen des Himmels vollkommen zwanglos und erschöpfend. Wir verdanken diese Erklärung Clausius *), dessen Arbeit aber leider nicht so bekannt geworden ist, als daß nicht immer und immer wieder Erklärungsversuche desselben Phänomens auftauchten, die sich

*) Rud. Jul. Eman. Cl., geb. 1822 in Coslin, war erst Professor in Zürich, dann in Würzburg, ist jetzt Professor in Bonn.

mit dem hier vorgeführten in Bezug auf Deutlichkeit und Vollständigkeit entfernt nicht messen können.

In ähnlicher Art wie die Farben dünner Blättchen entstehen die Perlmutterfarben oder Farben irisierender Körper. Sie treten an Oberflächen auf, welche von feinen Ritzen, in gleichen, aber sehr kleinen Abständen durchzogen sind. Von dem nämlichen Punkte der Lichtquelle ausgehende Strahlen kommen dann in der Tiefe der Ritzen und auf ihren benachbarten etwas höher liegenden Rändern nahezu gleichzeitig an und werden reflektiert. Nach der Reflexion aber haben die von den Erhöhungen zurückgehenden Strahlen einen etwas kürzeren Weg gemacht als die in den Vertiefungen zurückgeworfenen. Beide gelangen somit zur Interferenz und es entstehen ganz wie bei den dünnen Blättchen Farben. Da dieselben nur in der Beschaffenheit der Oberfläche der Körper ihren Grund haben, diese aber durch Abdrücken einer Siegellackfläche z. B. mitgeteilt werden kann, so hat es, da letztere nach dem Abdruck dieselben Farben zeigt wie die ihn hervorrufende Fläche, den Anschein, als ließen sich solche Farben abdrücken.

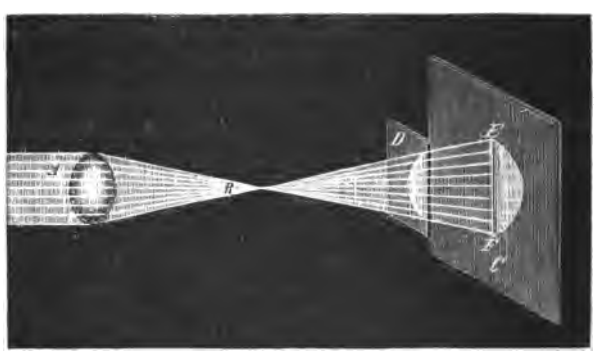
Auch die blauen Flecken, welche bei alten Ölbildern sich oft zeigen, dürften auf die Farben zurückzuführen sein, die in sehr feinen Sprüngen in dem Firnis entstehen. Feuchtet man die Bilder an, so verschwinden sie, weil sich die Risse mit Wasser anfüllen, welches das Licht in ähnlicher Weise wie der Firnis bricht. Beim Trocknen treten sie aber wieder auf. Dauernd werden sie, wie Pettenkofer*) entdeckt hat, vertrieben, wenn man die Bilder über ein flaches, mit Weingeist gefülltes Gefäß legt, so daß sie nicht mit diesem, wohl aber mit seinen Dämpfen in Berührung kommen. Dieselben lösen den Firnis an seiner Oberfläche, ohne ihn zu entfernen, und der nunmehr erweichte schließt die Ritzen von selbst zu.

Durch die Entdeckung der Thatsache, daß Licht zu Licht gefügt Dunkelheit geben kann, hatte Fresnel hauptsächlich den

*) Max P., geb. 1818 in Lichtenheim, Professor in München.

Sieg der Undulationstheorie des Lichtes entschieden. Um diesen Sieg aber vollständig zu machen, galt es noch einen gewichtigen Einwand der Gegner zu entkräften, der darin bestand, daß wenn das Licht eine Wellenbewegung sei, sich seine Wellen, wie die des Wassers und der Luft, auch um eine Ecke ausbreiten müßten. Hören könne man wohl um eine Ecke, sehen aber nicht, und das stimme durchaus nicht mit der Annahme der Lichtwellen. Fresnel wies auch diesen Einwand durch die Untersuchung und Erklärung einer Anzahl von Erscheinungen zurück, die, seit sie Grimaldi**) in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts zuerst beobachtet

Fig. 99.



hatte, unter dem Namen der Inflexions- oder Beugungserscheinungen wohl bekannt waren. Man beobachtet sie leicht folgendermaßen: Man läßt durch eine Öffnung im Laden eines verdunkelten Zimmers ein Bündel Lichtstrahlen auf eine Sammellinse A, Fig. 99, fallen, die dieselben nach ihrem Brennpunkte B lenkt, von wo sie dann als stark konvergierender Strahlenkegel BEF weitergehen. Auf einem in diesen gestellten Schirme C würden sie dann einen Lichtkreis entwerfen, dessen Größe von dem Abstand des Schirmes von B abhinge. Stellt man nun

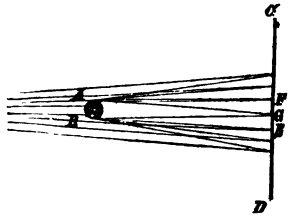
*) Francesco Maria G., geb. 1613 in Bologna, war Jesuit und Lehrer der Mathematik in seiner Vaterstadt, wo er 1663 starb.

einen zweiten kleineren Schirm D in den Strahlenkegel, so ... verdunkelt der Schatten desselben einen Teil des hellen ... Kreises auf C, aber ... Satz ... Schatten eine scharfe Begrenzung zeigt, wie man erwarten sollte, so findet man seine Grenze EF im weißen Licht von farbigen, im homogenen Licht von hellen und dunkeln Streifen umgeben, welche genau das Ansehen derjenigen Streifen zeigen, welche man mit Fresnels Spiegel erhält. Mißt man nach, so findet man, daß dadurch die geometrische Schattengrenze nicht mit dem wirklichen Schatten übereinstimmt, sondern daß Licht noch in den geometrischen Schatten hineinfällt. Dies sieht man besonders leicht, wenn man als schattengebenden Körper in den von der Linse erzeugten Strahlenkegel eine Stricknadel stellt. Zu beiden Seiten des Schattens derselben treten dann die Streifen auf, die Mitte des Schattens aber ist hell, es muß also Licht in den Schatten eingedrungen sein.

Die Erklärung dieser Beugungserscheinungen erfordert ein genaueres Eingehen auf die Art der Fortpflanzung des Lichtes, als wir bisher für nötig gefunden haben. So paradox es klingt, so hat doch bereits Huygens den Nachweis geführt, daß die Vorstellung der Fortbewegung des Lichtes in geraden Linien keineswegs die natürlichste Annahme von diesem Vorgange ist. Da ja die Lichtbewegung dadurch entsteht, daß eines oder mehrere Ätherteilchen in Schwingungen versetzt werden, die sie dann nach allen Richtungen hin auf benachbarte Ätherteilchen übertragen, so muß jedes Ätherteilchen, welches von der Wellenbewegung ergriffen wird, Mittelpunkt einer neuen Wellenbewegung werden, die sich jedoch nur nach der Seite fortpflanzen würde, nach welcher die Bewegung fortschreitet, da ja die Ätherteilchen, die auf der Seite liegen, von welcher die Bewegung kommt, dadurch zur Ruhe kommen müssen, daß sie die benachbarten in Schwingungen versetzen. Gerade so bleibt eine Billardkugel, welche in der Mitte angestoßen, auf eine ruhende ebensolche trifft, stehen, während diese fortrollt. Nun zeigte aber Huygens weiter, daß diese genauere Ansicht von der Art der Fortbewegung der Lichtwelle übereinstimmt mit der

Annahme von der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes. Ist nämlich eine kugelförmige Welle bis zu einem gewissen Abstand fortgeschritten, so werden die Teilchen, die nunmehr als Bewegungscentren anzusehen sind, auf einer Kugel liegen, deren Radius eben dieser Abstand ist. Diese Teilchen werden dann Mittelpunkte von neuen kugelförmigen Wellen werden, deren seitliche Teile sich durch Interferenz aufheben. An solchen Punkten kommen ja stets Bewegungen an, welche um ein weniges verschiedene Wege zurückgelegt haben, also Impulse nach entgegengesetzten Richtungen erteilen. Nur an denjenigen Punkten, welche auf den Verbindungslinien dieser neuen Bewegungscentren mit dem ursprünglichen liegen, wird dies nicht der Fall sein, hier werden die Bewegungsimpulse sämtlich gleichzeitig in der einen oder in der anderen Richtung erfolgen, hier werden also die Teilchen zu lebhafter Bewegung angeregt werden. Man wird sich somit die Bewegung beliebig als geradlinig vom Hauptcentrum fortschreitende oder als eine solche, die in jedem Augenblick von unzähligen untergeordneten Bewegungscentren ausgeht, vorstellen können. Man wird sie sich als auf die letztere Art erfolgend vorstellen müssen, wenn ein Teil der untergeordneten Centren dadurch außer Wirksamkeit gerät, daß ihre Bewegung durch einen festen Körper gehemmt wird, der an demselben Orte aufgestellt worden ist, an welchem sie sich befinden.

Fig. 100.



Dies findet aber statt bei den Inflexionsversuchen. Stellt also A B, Fig. 100, den Querschnitt der Stricknadel dar, C D den Schirm, so müssen die Lichtwellen, deren Centren die Punkte A und B sind, in den geometrischen Teil des Schattens gelangen. In G werden also die von A und B kommenden Strahlen zusammentreffen, nachdem sie die gleich großen Wege A G und B G zurückgelegt haben. Sie werden demnach einander verstärken, es wird in G ein heller Streifen auftreten. In E wird die

Lichtbewegung bedingt durch den direkten daselbst ankommenden Strahl und denjenigen, welcher vom Brennpunkt der Linse kommend nach B und von da nach E gelangt. Beträgt der Unterschied dieser Strahlen eine halbe Wellenlänge, so entsteht hier Dunkelheit, und dasselbe muß bei F stattfinden; neben diesen dunkeln Streifen müssen dann wieder helle liegen, diesen dunkele folgen, und man wird somit dieselben Erscheinungen wie bei den Fresnel'schen Spiegeln erhalten, dunkele und helle Streifen im homogenen, farbige Streifen im weißen Licht. Ganz ebenso sind die Streifen zu erklären, die in der Anordnung des Versuches auftreten, wie sie Fig. 99 zeigt, und man sieht mithin, daß auch die Lichtwellen sich um einen Körper herumbewegen können. Aber es erhellt auch sofort, daß, wenn man die Forderung stellen sollte, man solle um die Ecke sehen, wie man um die Ecke hören könne, man von dem Lichte viel mehr verlangen würde als vom Schalle. Von letzterem erwartet man nur die Töne zu hören, die äquivalente Forderung an das Licht würde also nur die sein, Farben erscheinen zu lassen und dieser Forderung wird genügt, wie wir sahen. Die Unklarheit kommt daher, daß man unter Sehen gewöhnlich auch die Auffassung der Formen versteht, was selbstverständlich die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes voraussetzt. Niemand denkt aber daran, daß uns das Ohr zur Auffassung von Formen dienen könne.

Man kann nun auch die Inflexionsstreifen nur auf dem Hintergrunde des Auges entwerfen und so zu ihrer Beobachtung das dunkele Zimmer entbehren. Dazu betrachtet man am besten einen Lichtpunkt, wie ihn das Reflexbild der Sonne in einem runden metallenen Knopfe bietet, durch einen engen Spalt. Man sieht dann zu beiden Seiten des Lichtpunktes farbige Streifen. Macht man die Öffnung dreieckig, so erhält man an der dritten Seite ebenfalls die Streifen, und ebenso bei mehrseitigen Öffnungen an jeder ihrer Seiten. Eine kreisrunde Öffnung zeigt in derselben Weise den Lichtpunkt von kreisförmigen Inflexionsstreifen umgeben. Bringt man in dem Schirme, der vor das

Auge gehalten wird, mehrere Öffnungen an, so erhält man Streifen, die zum Teil aufeinander fallen und dadurch wieder zu weiteren Interferenzen Veranlassung geben, die meist sehr intensive Farben hervorrufen. Derartige Inflexionsstreifen entstehen, wenn wir bei halb geöffneten Augen einen Lichtpunkt betrachten, durch die engen Zwischenräume zwischen den Augenwimpern; sie erscheinen wie farbige Strahlen, welche sich von dem Punkte gegen unser Auge hin erstrecken. Einen Schirm mit vielen Öffnungen erhält man nun aber auch, wenn man ein Stück lose gewebten Zeuges (Flor, Gaze) oder ein feines Drahtgeflecht vor das Auge hält, der Lichtpunkt erhält dann durch die Inflexionsstreifen das Ansehen eines Sternes, welcher soviel Strahlen hat, als die im Gewebe befindlichen Öffnungen Seiten zeigen.

Je enger nun solche Öffnungen sind, desto breiter werden die von ihnen entworfenen Inflexionsstreifen; bei ganz engen Öffnungen und bei Anwendung von weißem Lichte können sie so breit werden, daß sie besondere Spektren von großer Schönheit, sogenannte Höfe darstellen. Man erhält dieselben künstlich, indem man ein Licht durch eine mit Bärlappsporen möglichst gleichmäßig bestreute Glastafel betrachtet, oder durch ein dünn mit Wasser beschlagenes Schaufenster eines Ladens die im Innern desselben brennenden Gasflammen anblickt. Sie erscheinen kreisförmig, da die nach allen Richtungen auftretenden Spektren sich zu farbigen Ringen vereinigen. Nichts anderes wie solche Höfe sind aber auch die farbigen Ringe, welche der Wanderer im Hochgebirge oder der in den Mastkorb emporgestiegene Nordpolfahrer um den Schatten seines Kopfes erblickt, wenn derselbe auf Nebelmassen fällt. Der Nebel reflektiert dann aus verschiedenen Tiefen das Sonnenlicht, welches am Kopfe des schattenwerfenden Menschen vorbeigeht und in denselben Farben zurückgestrahlt wird, die es im Nebel durch Beugung an dem einen Schirm darstellenden Schatten des Kopfes empfing.

Mit diesen Höfen sind übrigens die Halos, meist farbige Ringe, nicht zu verwechseln, die in größerer Entfernung um

Sonne und Mond nicht selten auftreten und leicht die Erscheinung von Nebensonnen geben. Sie entstehen durch eine Reflexion und zwei Brechungen des Lichtes an dreiseitigen Eiskrystallen, die in sehr gleichmäßiger Lage in den höheren Schichten der Atmosphäre schweben, wenn sich in denselben wasserdampfhaltige, vom Äquator stammende Luftmassen ausgebreitet haben.

Fluorescenz, Phosphorescenz und chemische Wirkung des Lichtes.

Ehe wir unsere Betrachtungen über das Licht schließen, haben wir noch über einen Punkt Rechenschaft zu geben, den wir bis dahin gänzlich bei Seite gelassen haben, nämlich über die Lichtverluste, die bei der Absorption auftreten. Wir erklärten die Entstehung der dadurch hervorgerufenen Farben, indem wir eine Teilung des weißen Lichtes konstatierten; ein Teil ging hindurch und mußte folglich farbig erscheinen, ein Teil blieb zurück und es erwächst uns nun noch die Aufgabe, zu untersuchen, was aus diesem wird.

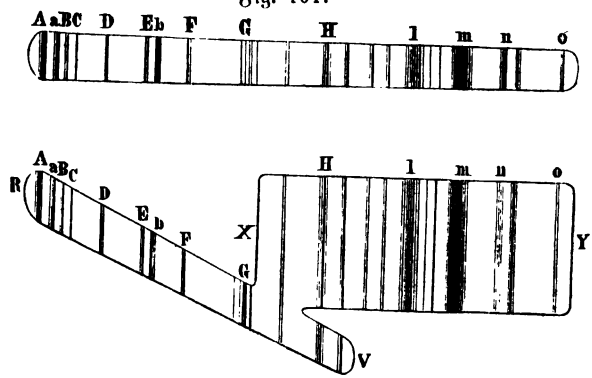
Da das Licht durch Ätherschwingungen entsteht, so liegt zunächst die Vermutung nahe, daß die verschwundenen Schwingungen als solche anderer Art wieder auftreten. Da aber Lichtschwingungen nur dann verschwinden, wenn das Licht auf einen Körper fällt, so muß den Körperatomen ebenfalls eine wichtige Rolle bei diesem Vorgange zukommen. Sehen wir also zunächst zu, ob sich Vorgänge auffinden lassen, die auf eine derartige Umsetzung des Lichtes bei der Absorption hindeuten.

Wir haben oben die Absorption des Lichtes in der Chlorophyllösung betrachtet, die im durchfallenden Lichte smaragdgrün aussah und ein sehr charakteristisches Absorptionsspektrum zeigte. Betrachten wir nun aber die grüne Lösung im auffallenden Lichte, so erscheint sie rot, und läßt man den Lichtkegel hineinfallen, den eine in die Sonnenstrahlen gehaltene Sammellinse entwirft, so scheint derselbe in blutroter Farbe zu leuchten. In derselben Weise verhalten sich andere Körper, Flußspat sieht im durchfallenden Lichte farblos, im auffallenden violett aus, ebenso

erscheint der Lichtkegel, den eine Linse hineinwirft, violett. Uranglas zeigt in gleicher Weise gelb und hellgrün, Curcumatinktur hellbraun und grün, gewöhnliches Petroleum gelb und hellblau, Wasser, in welches man Kastanienrinde geworfen hat und welches daraus einen Äsculin genannten Stoff gelöst hat, farblos und hellblau, dieselben Farben zeigt endlich schwefelsaures Chinin, welches man unter Zusatz von einer Spur Schwefelsäure in Wasser gelöst hat.

Gerade die Lösung von schwefelsaurem Chinin hat in den Händen von Stokes*) dazu gedient, die Gesetze dieser Zweifarbig-

Fig. 101.



keit zu ergründen, die man Fluorescenz nannte, weil sie am Flußspat (Fluorcalcium) zuerst beobachtet wurde. Ob Licht einer jeden Farbe geeignet ist, Fluorescenz hervorzurufen, findet man am besten, indem man auf die Oberfläche einer fluorescierenden Flüssigkeit oder auf ein Papier, welches mit derselben getränkt ist, ein scharfes Spektrum entwirft. Thut man dies mit Papier, welches mit Lösung von schwefelsaurem Chinin wiederholt bestrichen wurde, so erhält man das in Fig. 101 als oberstes gezeichnete Spektrum, welches sich von einem gewöhnlichen Sonnenspektrum dadurch

*) George Gabr. Stokes, geb. 1819, war Professor in Cambridge, wo er 1878 starb.

unterscheidet, daß es viel länger ist. Es hört bei den Linien H nicht auf, sondern erscheint über sie hinaus etwa um seine eigene Länge vergrößert. In dieser Verlängerung treten eine große Anzahl Fraunhofer'scher Linien auf, welche man mit l, m, n, o 2c. bezeichnet hat. Hieraus folgt zunächst, daß ein auf gewöhnliche Art entworfenes Spektrum noch eine Menge brechbarerer Strahlen enthält, als es die violetten sind, daß wir dieselben aber für gewöhnlich nicht sehen können. Der auf den ersten Blick durchaus rätselhafte Ursprung des Lichtes, welches als verlängertes Spektrum auftritt, wird nun sofort klar, wenn man nach Art von Newtons Experimentum Crucis dieses Spektrum durch ein Prisma betrachtet, dessen brechende Kante horizontal gehalten wird. Es zeigt sich dann das untere Spektrum der Fig. 101. Außer dem gewöhnlichen schief liegenden Spektrum R V tritt von G ab ein zweites horizontales X Y auf, welches von den Fraunhofer'schen Linien H bis o durchzogen ist und also von dem Lichte des verlängerten Spektrums herrühren muß. Oben ist dasselbe rot, unten blau, also sind die Teile dieses Spektrums von der Brechbarkeit der Strahlen des gewöhnlichen Spektrums, welche man findet, wenn man von der betreffenden Stelle von X Y Horizontale nach R V hinzieht. Dies neue Spektrum muß also seine Entstehung den Strahlen größter Brechbarkeit verdanken, die für uns meist unsichtbar sind, aber dadurch sichtbar werden, daß sie das schwefelsaure Chinin in Strahlen geringerer Brechbarkeit verwandelt. Ist das nun richtig, dann müssen die Strahlen, welche die Fluorescenz erregt haben, von dem schwefelsauren Chinin absorbiert sein, und in der That erhält man keine Fluorescenz mehr von Licht, welches durch die fluorescierende Lösung gegangen und hier mithin der Strahlen beraubt worden ist, welche die Fluorescenz erregen können. Ähnliche Resultate erhält man bei den Versuchen mit anderen fluorescierenden Körpern. Ein auf der Oberfläche einer Chlorophyllösung z. B. entworfenes Spektrum erscheint nur rot, aber viel leuchtender an den Stellen, wo die Absorptionsbanden liegen.

Betrachtet man es mit dem zweiten Prisma, indem man dessen Kante der Längenausdehnung des Spektrums parallel hält, so erscheint das Spektrum als Ganzes verschoben, es enthält nur Licht derselben Brechbarkeit und zwar von der Brechbarkeit des ersten Absorptionsstreifens des Chlorophyllfarbstoffes. Diese Beobachtungen haben nun allgemein die Eigenschaft der fluorescierenden Körper ergeben, das absorbierte Licht, als Licht von anderer und zwar meist geringerer Brechbarkeit wieder auszustrahlen. Es entsteht also in der Lösung selbst Licht und es hat dadurch den Anschein, als besäße sie an den bestrahlten Stellen eigene Leuchtkraft.

Man hat sich nun viele Mühe gegeben, den Grund aufzusuchen, warum das Auge das ultraviolette Licht nicht zu sehen imstande ist. Beleuchtet man es mit Licht von großer Brechbarkeit, so zeigen Hornhaut und Linse weißblaues Fluorescenzlicht. Man glaubte deshalb annehmen zu dürfen, daß der ultraviolette Teil des Spektrums uns unsichtbar wird, weil das ihn hervorrufende Licht von Linse und Hornhaut absorbiert wird. Indessen zeigte Donders, daß Licht, welches durch Linse, Hornhaut und Glaskörper eines Ochsenauges gegangen war, noch Fluorescenz in einer Chininlösung hervorzurufen vermag und daß somit die obige Erklärung der Unsichtbarkeit der ultravioletten Strahlen nicht richtig sein kann. Man muß den Grund derselben vielmehr mit Helmholtz in der Unempfindlichkeit des Auges gegen jenes Licht suchen. Doch hat Helmholtz auch gezeigt, daß, wenn man anstatt der Prismen und Linsen von Glas solche von Bergkrystall verwendet, der größte Teil des Spektrums sichtbar wird und daß mithin das Glas sehr viel ultraviolette Strahlen absorbiert. Wie übrigens die Fluorescenz eine so ausgebreitete Eigenschaft ist, daß fast jeder Körper dieselbe, wenn auch in sehr geringem Maße zeigt, so hat auch Helmholtz nachgewiesen, daß die Netzhaut des Auges schwach fluoresciert.

Die Umwandlung der Strahlen einer Brechbarkeit in die einer anderen durch Vermittelung der Körperatome, wie sie sich

als Fluorescenz geltend macht, steht nun nicht vereinzelt da. Es giebt vielmehr eine große Gruppe anderer Körper, der phophorescierenden, welche diese Eigenschaft noch über den Zeitraum hinaus behalten, während welches sie der Bestrahlung ausgesetzt sind. Dazu gehören außer dem Diamant, dem Kalkspat, der Chlorophan genannten Varietät des Flußspates ꝛc., vornehmlich eine Anzahl künstlich hergestellter chemischer Körper, so das Schwefelcalcium und Schwefelstrontium. Alle diese Phosphore oder Leuchtsteine genannten Körper haben die Eigenschaft, wenn sie eine Zeit lang belichtet werden, noch lange in einer dem betreffenden Stoffe eigentümlichen Farbe nachzuleuchten und zwar um so länger, je intensiver das Licht war, welchem sie ausgesetzt wurden. Diese Eigenschaft der Phosphorescenz muß also in einer Fähigkeit der Atome beruhen, die Lichtbewegung auch dann noch hervorrufen zu können, wenn der Antrieb dazu bereits erloschen ist. Es scheint nun, als ob diese Eigenschaft, wenn auch meistens in sehr geringem Maße, allen Körpern zukomme. Wenigstens fand Becquerel*) mit Hilfe eines Apparates, der ihm die Betrachtung der Körper im Dunkeln sofort nach Unterbrechung ihrer Bestrahlung erlaubte, während Bestrahlung und Verdunkelung in rascher Folge wechselten, keine Substanz, die nicht wenigstens für einen ganz kurzen Moment nachgeleuchtet hätte. Man hat sich neuerdings von der Phosphorescenz wichtige Verwendung für Beleuchtung von Räumen, in denen sich leicht entzündliche Stoffe befinden, versprochen, doch sind trotz des größten Aufwandes an Reklame die Erfolge weit hinter den Erwartungen zurückgeblieben und wird sich die Verwendung der Leuchtsteine höchstens für Zifferblätter von Taschenuhren, Deckel für Zündholzbüchschen ꝛc. eignen, um auch bei tiefster Dunkelheit den Ort anzuzeigen, wo diese Gegenstände sich befinden. Für Anwendung im Großen ist die Leuchtfarbe zu teuer und zu wenig haltbar.

*) Alex. Edmonde B, geb. 1820 in Paris, ist Professor daselbst.

Fluorescenz und Phosphorescenz sind dauernde Eigenschaften eines Körpers; indem sie hervorgerufen werden, kann somit eine Änderung der chemischen Natur desselben nicht bewirkt werden. Doch ist das Licht imstande, auch solche einzuleiten. Hierfür ist wieder die Chlorophyllösung ein merkwürdiges Beispiel. Im Dunkeln kann man dieselbe beliebig lange unverändert bewahren, bei Belichtung nur, wenn, wie ich zuerst nachgewiesen habe, der Sauerstoff der Luft sorgfältig von ihr abgeschlossen wurde. Anderenfalls verliert sie sehr rasch ihre grüne Farbe und wird bräunlich gelb. Das Licht muß also die Verbindung des Chlorophylls mit Sauerstoff einleiten. Dasselbe findet statt bei einem Gemisch von gleichen Teilen Chlor und Wasserstoff. Im Dunkelen aufbewahrt, verbinden sich beide Gase nicht, bringt man aber das sie enthaltende Gefäß in die Strahlen der Sonne, so geht die Verbindung so rapide vor sich, daß eine heftige Explosion erfolgt. Aber auch Zersetzung kann das Licht bewirken. Es ist ja bekannt, daß das unter dem Namen Höllenstein als Ätzmittel vielbenutzte Silbernitrat nur im Dunkeln aufbewahrt werden darf, wenn das darin enthaltene Silber nicht ausgeschieden werden soll. Aus demselben Grunde wird Chlorsilber im Lichte erst violett und dann schwarz und ähnlich verhalten sich Jod- und Bromsilber.

Da diese chemischen Wirkungen des Lichtes namentlich in den Strahlen geringerer Brechbarkeit auftreten, so hat man lange geglaubt, es könnten dieselben nur von diesen hervorgerufen werden, und nannte deshalb diese Strahlen chemische. Daß diese Voraussetzung jedoch irrig ist, beweist z. B. das Verhalten des Chlorophylls, welches durch alle Strahlen, die es in genügender Stärke absorbieren kann, angeregt wird, sich mit Sauerstoff zu verbinden. Es scheint also, als würde das absorbierte Licht in diesen Fällen dazu verwendet, eine chemische Verbindung zu bewirken.

Auf der Zersetzung der Silbersalze durch das Licht beruht das Photographieren. Da diese Zersetzung in Gegenwart organischer Substanzen leichter vor sich geht als ohne dieselbe,

so benutzt man als lichtempfindliche Platte eine Glastafel, welche mit Gelatine, Collodium ꝛc. und darin suspendirten Silbersalzen überzogen ist. Diese wird als Hinterwand in eine Camera obscura eingesetzt und ein Bild des Gegenstandes auf ihr entworfen. An den belichteten Stellen des Bildes scheidet sich das Silber aus und wird durch Übergießen mit Eisenvitriol oder Pyrogallussäure sichtbar gemacht; doch hängt die Menge des ausgeschiedenen Silbers von der Stärke der Beleuchtung der betreffenden Stelle ab. Die hellen Teile des Gegenstandes werden also im Bild dunkel und umgekehrt, man erhält ein negatives Bild. Dies wird fixiert, indem man das unzersetzte Silbersalz entfernt, wobei man die Platte vor und während dieser Operation sorgfältig vor Licht bewahrt. Die so zubereitete Platte legt man nun auf ein Papierblatt, welches mit einer dünnen Schicht von Chlorsilber überzogen ist, indem es erst mit Kochsalzlösung und dann mit Silbernitratlösung befeuchtet wurde, und setzt beide nun längere Zeit dem Lichte aus. Das unzersetzte Chlorsilber wird endlich mit einer Lösung von Natriumhyposulfit, von dem es leicht aufgenommen wird, abgewaschen und so das fixierte positive Bild erhalten.

So haben wir gesehen, daß für verschwindendes Licht bestimmter Art solches anderer Art auftreten und daß es zur Einleitung eines chemischen Prozesses benutzt werden kann. Es bleibt nun noch der Vorgang zu betrachten, bei dem anstatt seiner Wärme auftritt.

Diese Untersuchung können wir jedoch erst durchführen, nachdem wir die Gesetze der Wärme kennen gelernt, uns über das Wesen dieses Agens, welches viel Ähnlichkeit mit dem Lichte, aber auch mannigfache Verschiedenheit von ihm zeigt, eine Ansicht gebildet haben. Es wird alsdann auch ins Auge zu fassen sein, in welcher Art die Körpermoleküle an den zuletzt besprochenen Erscheinungen teilnehmen.

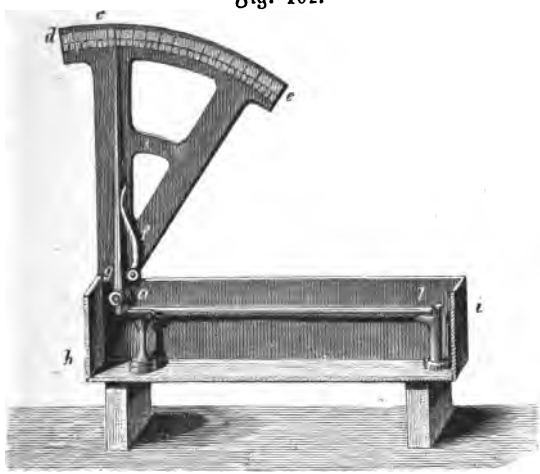
Die Wärme.

Ausdehnung der Körper durch die Wärme und Thermometrie.

Indem wir uns zur Betrachtung der Wärmeerscheinungen und deren Ursachen wenden, befinden wir uns in weitaus ungünstigerer Lage, als wir es bei der Untersuchung der optischen Erscheinungen waren. Dort kam uns ein auf das höchste ausgebildeter, für feine Nuancen jeder Art äußerst empfindlicher Sinn zu Hilfe, während uns nunmehr in dem Empfindungsvermögen unserer Haut für Wärme, dem Wärmesinn, nur eines der stumpfesten unserer Sinneswerkzeuge zur Verfügung steht. Wie gering die Empfindlichkeit desselben ist ergiebt sich sofort aus der kleinen Zahl von Unterschieden in den Wärmeempfindungen, welche als Resultat der Beobachtungen so vieler Millionen Menschen in den Wörtern unserer Sprache niedergelegt sind. Die Stufenleiter unserer Wärmeempfindungen hat nur die Bezeichnungen heiß, warm, lau, kühl und kalt aufzuweisen und diese große Armut des Wortschatzes läßt nur zu sehr befürchten, daß wir von unserm Wärmesinn wenig Aufklärung zu hoffen haben. Dies ist in der That der Fall, zudem aber ist dies Wenige auch noch höchst unzuverlässig, wie man leicht erkennt, wenn man in drei neben einander aufgestellte Gefäße heißes, laues und kaltes Wasser gießt, den Zeigefinger der einen Hand während einiger Minuten in das kalte, den der andern in das heiße Wasser hält und beide dann plötzlich in das laue Wasser bringt. Sind die Temperaturen richtig gewählt, so hat der aus dem kalten Wasser kommende Finger die Empfindung der Wärme, der aus dem heißen kommende diejenige der Kälte. Die Beurteilung der näm-

lichen Temperatur hängt also von der Qualität von Empfindungen ab, die kurz vorher den Sinn in Anspruch nahmen. Dazu kommt nun noch, daß über die Art der Wärmeempfindung derselbe uns jede Auskunft verweigert im Gegensatz zum Gesichtssinne, welcher uns Licht der verschiedensten Farben leicht unterscheiden läßt. Der Wärmesinn kann somit wohl zur Herbeiführung eines körperlichen Behagens oder zur Warnung vor Gefahren, die unserm Leibe drohen, dienen, irgendwelche Förderungen unserer Erkenntnis aber nicht gewähren. Vor allen Dingen

Fig. 102.



haben wir uns also nach Mitteln umzusehen, mit deren Hilfe wir die Wärmezustände oder Temperaturen der Körper mit aller Sicherheit bestimmen können, dann aber werden wir zu untersuchen haben, ob in ähnlicher Weise wie es verschiedene Lichtarten giebt, auch verschiedene Wärmearten zu unterscheiden sein werden.

Um die erste dieser Aufgaben zu lösen, werden wir uns zunächst nach andern Wirkungen der Wärme auf die Körper umsehen müssen. Wir bedienen uns dabei des Apparates, welchen Fig. 102 im

Durchschnitte darstellt. Ein Metallstab ist bei a und l durch zwei Messingsäulchen so gestützt, daß er über den oberen Teil von a hingleiten kann, während er bei l ein festes Widerlager findet, Sein Ende bei a drückt gegen einen kurzen Arm, der auf einer Achse g befestigt ist. Dieselbe Achse trägt einen nach der andern Seite gerichteten Zeiger ac, welcher, wenn er sich mit der Achse dreht, vor der Kreisteilung auf de hingeht. Dabei muß dieser Zeiger, wenn er sich von d nach e bewegt, eine Messingfeder f zurückdrängen, die fortwährend Widerstand leistend bewirkt, daß der kurze auf der Achse sitzende Arm stets gegen das Ende o des Stabes gepreßt wird. Der den Stab tragende Teil des Apparates wird nun in ein parallelepipedisches Gefäß hi eingesetzt und darauf dieses mit Eis gefüllt. Der Zeiger nimmt alsdann eine bestimmte Stellung auf der Skala ein, welche man ablieſt. Entfernt man nun das Eis und bringt statt dessen Wasser in das Gefäß hi, welches man bis zum Sieden erhitzt, so sieht man, wie der Zeiger ac sich über die Skala in der Richtung von d nach e bewegt. Kühlt sich das Wasser dann wieder ab, so geht der Zeiger zurück. Der Stab muß also durch das Erwärmen länger werden. Der Versuch ergiebt das gleiche Resultat, aus welchem Material der Stab al auch besteht. Die Erwärmung muß somit eine Verlängerung der Stäbe bewirken, die Abkühlung aber eine Verkürzung.

Daß dies nun wirklich der Fall ist, dafür sprechen auch mancherlei Erfahrungen der Techniker. So dürfen sie Eisenbahnschienen nicht genau gegen einander stoßen lassen, sondern es muß zwischen den aneinandergelegten ein kleiner Spielraum bleiben, weil die Schienen sonst, indem sie zur geradlinigen Ausdehnung keinen Platz finden, bei starker Erwärmung krumm werden. Auch muß ihre Befestigung auf den Schwellen eine derartige sein, daß sie ihnen eine kleine Bewegung in ihrer Längsrichtung gestattet. Sucht man in diesen Fällen den schädlichen Wirkungen der Verlängerung des Stabes durch die Wärme vorzubeugen, so hat man sie auch mit Nutzen angewendet, um Mauern, die durch

Senkung ihrer Fundamente ihre senkrechte Stellung verloren hatten, wieder in dieselbe zu bringen. Haben sich dabei die oberen Teile paralleler Umfassungsmauern eines Gebäudes von einander entfernt, wie dies oft geschieht, so legt man durch beide eine Eisenstange, erhitzt dieselbe sehr stark und befestigt Klammern auf ihren beiden Enden. Bei der in Folge der Abkühlung eintretenden Verkürzung werden dann die Mauern wieder emporgerichtet. Nötigenfalls kann man diese Operation mehrmals wiederholen.

Fig. 103.

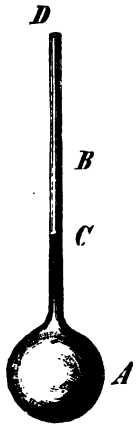
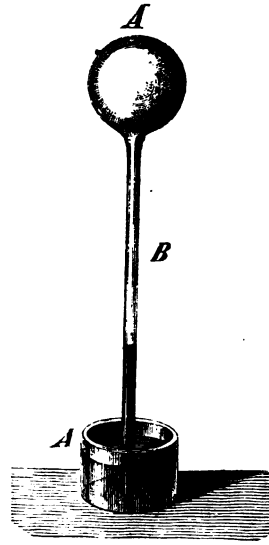


Fig. 104.



Daß indessen die Wärme nicht nur eine Verlängerung eines Stabes, sondern eine Volumzunahme desselben ergiebt, zeigt sich daran, daß der erwärmte Stab in ein Loch, in das er kalt genau paßte, erhitzt nicht mehr hineingeht, daß eine Kugel aus irgend welcher Substanz, welche bei gewöhnlicher Temperatur gerade durch einen Ring geht, auf diesem liegen bleibt, nachdem sie erhitzt ist, aber hindurch fällt, sobald sie sich wieder abgekühlt hat ꝛc.

Flüssigkeiten und Gase werden von der Wärme ebenso

ausgedehnt wie feste Körper. Beides läßt sich leicht mit dem in Fig. 103 dargestellten Apparate zeigen, der aus einem Glasrohr D mit angeblasener Kugel A besteht. Füllt man die letztere so weit mit Flüssigkeit, daß dieselbe in das Rohr etwa bis C reicht, und erwärmt sie nun auf irgend welche Weise, so sieht man die Flüssigkeit steigen, um bei folgender Abkühlung wieder herabzusinken. Kehrt man dagegen, wie Fig. 104 zeigt, den leeren Apparat wieder um, sperrt dann die in ihm enthaltene Luft ab, indem man ihr unteres Ende in eine Flüssigkeit taucht, und erwärmt nun A, so sieht man zunächst durch die Flüssigkeit Luftblasen entweichen. Läßt man ihn hierauf sich wieder abkühlen, so treibt der Luftdruck die Flüssigkeit wieder empor. Ein wiederholtes Erwärmen dagegen treibt sie wieder herab, es muß also die Luft, welche den von der Flüssigkeit nicht eingenommenen Raum erfüllt, durch die Wärme ausgedehnt werden.

Die Erhebung der Flüssigkeit in dem Rohre B wird hiernach um so geringer sein, je höher die Temperatur ist, und umgekehrt. Es entging Galilei, der gegen 1593 diesen Versuch zuerst anstellte, nicht, daß alsdann einer jeden Temperatur ein bestimmtes Volumen des eingeschlossenen Gases und somit ein bestimmter Stand der Sperrflüssigkeit entsprechen müsse und daß somit das Rohr eines solchen Apparates nur mit einer Scala versehen werden müsse, um ein Mittel abzugeben, welches Temperaturen mit einander zu vergleichen erlaubte. Dieser Gedanke führte ihn demnach auf die Erfindung des Thermometers. Man sieht, die Skala ist das Wesentlichste dabei, und aus diesem Grunde kann Drebbel*), Fludd**) und Guericke***) nicht das Verdienst zugesprochen werden,

*) Cornelius Dr., geboren 1572 zu Alkmaar, war Erzieher der Prinzen des Kaisers Ferdinand II., lebte später am Hofe Jakobs II., wo er 1634 starb.

**) Robert Fl. geb. 1576 in Milgate in Kent, lebte nach vielen Reisen als Arzt in London, wo er 1637 starb.

***) Otto v. Guericke, geb. 1602 in Magdeburg, war von 1627 Ratsherr daselbst, von 1831—37 Ingenieur in schwedischen Diensten, wurde 1646 Bürgermeister in Magdeburg, legte aber 1681 seine Stelle nieder um zu seinem Sohne nach Hamburg zu gehen, wo er 1686 starb.

ihrerseits ebenfalls das Thermometer erfunden zu haben. Allerdings haben sie wohl mit unbedeutenden Änderungen denselben Apparat entworfen wie Galilei, aber indem sie die Skala wegließen, bewiesen sie, daß es sich für sie um die Construction des Perpetuum mobile handelte, welche Aufschrift auch Guericke an seinem Instrument anbrachte. Wenn man deshalb ohne weiteres zugeben kann, daß die genannten Männer ihre Erfindung selbständig machten, so folgt daraus noch lange nicht, daß auch sie das Thermometer erfunden haben, und man sollte jetzt, wo diese Sachlage aufgeklärt ist, endlich aufhören, einen jener drei auf andern Gebieten sehr verdienstvollen Forscher als den Erfinder des eben so wichtigen wie verbreiteten Instrumentes zu nennen.

So unbequem nun das von Galilei erfundene Luftthermometer war, so blieb man doch lange bei demselben stehen, obgleich es so nahe lag, das Instrument aus einem sehr schwer zu transportierenden und von dem Luftdruck abhängigen in ein solches zu verwandeln, das diese Übelstände nicht besaß. Man brauchte es ja nur, wie Fig. 103 zeigt, umzukehren und mit Flüssigkeit zu füllen, diese aber zur thermometrischen Substanz zu machen, indem man aus ihrem Volumen auf die Temperaturen schloß. Man mußte bei der geringeren Ausdehnung der Flüssigkeiten dann freilich die Kugel größer machen, oder sich mit der Beobachtung geringerer Höhenunterschiede des Spiegels der Flüssigkeiten in B begnügen, was aber keinen großen Nachtheil hatte, da diese Höhenunterschiede sich noch sehr gut beobachten ließen. Diesen Vorschlag machte zuerst Rey*), aber sein Instrument war nicht praktisch verwendbar; denn da er das Rohr offen ließ, so mußte die Flüssigkeit daraus nach und nach verdampfen, jedenfalls staubig und schmutzig werden. Den Schülern Galileis, die nach dessen Tode unter dem fürstlichen Schutz der Mediceer zur Accademia del Cimento zusammentraten, gebührt deshalb der Ruhm, die jetzt übliche Form der

*) Jean R., geb. in Bugues (Dep. Dordogne), war praktischer Arzt und starb 1645.

Flüssigkeitsthermometer erfunden zu haben, indem sie die in dem engen Rohre desselben enthaltene Luft durch Erwärmen austrieben und alsdann das Rohr zuschmolzen. Bei ihnen galt der Großherzog Ferdinand*) II. von Toscana für den Urheber dieses von da an das florentinische genannten Thermometers, im Gegensatz zu dem Galilei'schen, das fortan den Namen des belgischen oder Drebbel'schen führte.

Wollte man nun aber mittelst der neuen Instrumente Temperaturen vergleichen, so blieb zunächst nichts übrig, als eines derselben mit einer beliebigen Skala zu versehen und diese dann auf andere dadurch zu übertragen, daß man sie mit jenem Normalthermometer denselben Temperaturen aussetzte und die Angaben des letzteren auf den ersteren bemerkte. Indessen ergaben die Beobachtungen mit diesem Instrumente bald, daß gewisse Temperaturen unter allen Umständen merklich dieselben waren, so die Temperatur des gesunden menschlichen Körpers diejenige tiefer Keller, in noch höherem Grade aber die Temperatur des schmelzenden Eises. Namentlich diese mögen die Akademiker bei der Verfertigung ihrer Thermometer benutzt haben. Durch Vergleichung einer Anzahl dieser Instrumente, die in unserem Jahrhundert wieder aufgefunden wurden, hat man beweisen können, daß sie vortreffliche Thermometer verfertigt haben, aber es wurden auch mannigfache Klagen über die damals in Florenz hergestellten Instrumente laut. Mit Freuden begrüßte man deshalb die Thermometer, welche im Anfange des vorigen Jahrhunderts Fahrenheit**) verfertigte und die an Solidität und schöner Arbeit hinter vielen Thermometern unserer Zeit nicht sehr weit zurückstehen, wie zwei derselben, welche von mir im physikalischen

*) Ferdinand v. M., geboren 1610 in Florenz, bestieg 1621 den Thron und starb 1670 in Florenz.

**) Gabriel Daniel F., geb. 1686 in Danzig, ging als Kaufmann nach Amsterdam, wo er sich aber mit Anfertigung von gläsernen Apparaten beschäftigte. Er starb 1736 in Holland.

Kabinet der Universität in Leiden aufgefunden worden sind, beweisen.

Zwar gab auch Fahrenheit seinen Thermometern eine willkürliche Skala, deren Nullpunkt er an die Stelle legte, bis wohin die Oberfläche der thermometrischen Substanz sank, wenn der Apparat in eine Mischung von Eis und Salmiak getaucht wurde, da Fahrenheit irrtümlicherweise annahm, daß die Temperatur dieses Gemisches die niedrigste sei, welche man überhaupt erreichen könne. Als thermometrische Substanz wandte er aber bereits, einem Vorschlage Halleys *) folgend, Quecksilber an, der dasselbe um seiner Eigenschaft willen, die Temperatur eines mit dem Thermometer in Verbindung gebrachten Körpers sehr rasch anzunehmen, empfohlen hatte. Die Thatsache, daß die Schmelztemperatur des Eises stets dieselbe ist, kannte er übrigens auch und ebenso mag der Herstellung seiner späteren Thermometer die Entdeckung Halleys, daß auch das Sieden des Wassers bei einem Barometerstand von 760 mm stets bei der nämlichen Temperatur erfolgte, zu Gute gekommen sein. Die Skala erhielt er, indem er von seinem Nullpunkt eine Anzahl gleicher Teile, Temperaturgrade, nach oben auftrug, die so groß waren, daß an den Schmelzpunkt die Zahl 32, an den Siedepunkt 212 kam. Wir wissen nicht, was ihn zu der Annahme dieser Teilung bewog, möglichenfalls wollte er damit das Geschäftsgeheimnis wahren, indem er die festen Punkte, deren Wichtigkeit für das Auftragen der Teilung er hinlänglich kennen gelernt hatte, unkenntlich zu machen suchte.

Die von Fahrenheit gemachten Fortschritte in der Kunst, Thermometer zu verfertigen, bürgerten sich aber nur sehr allmählich ein. Die in Paris viel später hergestellten Thermometer waren viel roher als die seinigen und auch bei Bestimmung des Eispunktes that man dort 1740 wieder einen Schritt rückwärts. Es

*) Edmund H., geb. 1656 in Haggerston bei London, wurde, nachdem er mehrere wissenschaftliche Reisen gemacht hatte, 1703 Prof. in Oxford, 1720 königl. Astronom in Greenwich, wo er 1724 starb.

untersuchte damals Reaumur*) die Ausdehnung des Alkohols infolge seiner Erwärmung und fand, daß wenn man das Volumen einer gewissen Gewichtsmenge Alkohol bei der Temperatur des frierenden Wassers zu 1000 annahm, das Volumen derselben Gewichtsmenge bei der Siedetemperatur zu 1080 gesetzt werden müsse. Reaumur schlug deshalb vor, die Temperatur des frierenden Wassers 0 zu nennen, die des siedenden aber zu 80 anzunehmen und die den Abstand der beide Temperaturen bezeichnenden Punkte in 80 gleiche Teile zu teilen. Ein freilich nicht wesentlicher Fortschritt war hierbei die Einsetzung des Gefrierpunktes als Nullpunkt, ein sehr wesentlicher Rückschritt dagegen die Vertauschung des Gefrierpunktes des Wassers mit dem Schmelzpunkte des Eises. Wir werden nämlich sehen, daß obwohl die Temperatur des letzteren unter allen Umständen dieselbe ist, dies durchaus nicht gilt von derjenigen des ersteren. Man hat deshalb in der Folge den Gefrierpunkt wieder mit dem Schmelzpunkt vertauscht. Außer dem Reaumur'schen tauchten in derselben Zeit noch eine Menge anderer Vorschläge auf zur Einführung neuer Skalen, von denen sich jedoch nur die von Celsius**), allerdings in etwas veränderter Form, behauptet hat. Celsius schlug nämlich vor, den Siedepunkt mit 0, den Schmelzpunkt mit 100 zu bezeichnen. Nachdem diese Bezeichnung durch Strömer***) umgetauscht war, pflegt man die Celsius'sche Skala die zu nennen, bei welcher der Schmelzpunkt mit 0, der Siedepunkt mit 100 bezeichnet und der Raum zwischen beiden in 100 gleiche Teile geteilt ist. Die unterhalb des Nullpunktes liegenden Skalenteile erhielten Reaumur und Celsius einfach durch Fortsetzung ihrer Teilung über den Nullpunkt hinaus und für Thermometer mit Fahrenheit'scher Skala verfährt man jetzt ebenso. Im Gegensatz zu den oberhalb 0^0 liegenden ver-

*) Réné Antoine de R., geb. 1683 in La Rochelle, lebte als Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Paris. Er starb 1757 in Bermondière.

**) Anders C., geb. 1701 in Upsala, war Prof. daselbst und starb hier 1744.

***) Märten Str., geb. 1707 in Orebro, war erst Prof. in Upsala, dann in Carlscrona. Er starb 1770 in Upsala.

sieht man diese Grade mit dem Minuszeichen. Die Fahrenheit'sche Skala, die man durch ein beigefügtes F bezeichnet, so daß 60° F sechzig Grade der Fahrenheit'schen Skala bedeuten, ist jetzt noch in England und Holland, die Reaumur'sche (R) in Deutschland, die Celsius'sche (C) in Frankreich und Italien im Gebrauch. Auch bedient man sich der letzteren ihrer Centesimalteilung wegen je länger je ausschließlicher in der Wissenschaft und es wäre sehr zu wünschen, daß man sie auch im bürgerlichen Leben endlich allein annähme. Man kann freilich leicht die eine Skala in die andere umrechnen, wenn man bedenkt, daß 1° R soviel wie $^5/_4{}^0$ C oder wie $^9/_4{}^0$ F ist. Bei der Übertragung von R oder C in F muß man schließlich noch 32° zuzählen, bei der umgekehrten Rechnung von der Angabe in Fahrenheit'schen Graden dagegen vorher 32° abziehen. Wir werden in der Folge die Temperaturen stets in Celsius'schen Graden angeben.

Wenn nun auch der Gedanke, von welchem Reaumur bei der Wahl seiner Skala ausging, daß seine Grade die Volumzunahme des Alkohols wiedergeben sollten, auf den ersten Blick als recht zweckmäßig erscheint, so läßt ihn doch eine tiefer eingehende Prüfung als ganz wertlos erkennen. Man wollte ein Instrument zum Messen der Wärme konstruieren. Nun ist jedes Messen ein Vergleichen einer unbekannten Größe mit einer bekannten, die den Namen der Einheit führt, es setzt also den Begriff der Menge voraus. Von Menge aber kann überall da die Rede sein, wo zu etwas Vorhandenem ein Mehr zugefügt werden kann, wie es ja bei der Wärme der Fall ist. Man hat deshalb den Begriff der Wärmemenge einführen dürfen. Bei der geringen Empfindlichkeit unseres Wärmesinns kann man nun aber auf die Größe einer Wärmemenge nur aus der Volumenvergrößerung schließen, welche die einer thermometrischen Substanz zugeführte Wärmemenge bewirkt, und es muß somit auch die Wärmeeinheit von der beobachteten Ausdehnung hergenommen werden. Man ist übereingekommen, als Wärmeeinheit oder Calorie diejenige Wärmemenge anzunehmen, welche die Temperatur von 1 Kg reinen

Wassers von 0^0 C um 1^0 erhöht, also in dem Wasser gleichmäßig verteilt die dazu nötige Ausdehnung der thermometrischen Substanz zu bewirken imstande ist. Würden nun der Mitteilung gleicher Wärmemengen an die thermometrische Substanz auch stets gleiche Ausdehnungen entsprechen, dann würde allerdings das Thermometer als Wärmemesser ohne weiteres dienen können denn dann wären 2, 3, 4 . . . mal soviel Wärmemengen nötig, um ein Thermometer von 0^0 auf 2^0, 3^0, 4^0 . . . steigen zu lassen, als die Erhöhung seiner Temperatur von 0^0 auf 1^0 Grad bewirken würde. Wäre diese Ausdehnung aber bei verschiedenen Temperaturen eine verschiedene, dann müßte für alle möglichen Temperaturen erst die zugehörige Ausdehnung bestimmt werden, wenn das Thermometer wirklich als Wärmemesser sollte verwendet werden können.

Indem wir uns nun zur Untersuchung dieser Frage anschicken, stoßen wir zunächst auf eine so große Schwierigkeit, daß es scheint, als müßten wir gänzlich an der Lösung derselben verzweifeln. Denn indem wir zusehen wollten, ob ein Körper die einfache, doppelte, dreifache ꝛc. Wärmemenge zugeführt erhalten hat, wären wir ja auf das Thermometer als einziges Mittel, dies zu finden, angewiesen, auf denselben Apparat also, dessen Anwendbarkeit wir erst prüfen wollen. Wir würden uns also in einem Zirkel bewegen, aus dem uns jedoch die folgende Betrachtung befreien kann.

Die Ausdehnung der Körper durch die Wärme kann von der Substanz, aus der die Körper bestehen, und von der Wärme abhängen. Die Körper kommen nun in drei verschiedenen Zuständen, den sogenannten Aggregatzuständen vor, als feste, flüssige und gasförmige. Von den beiden letzten Zuständen unterscheidet sich der feste Aggregatzustand dadurch, daß ein in ihm befindlicher Körper mit größerer Kraft einer Zerteilung widerstrebt als die flüssigen und die gasförmigen Körper. Da dabei die Moleküle, aus denen die festen Körper bestehen, aus ihrer gegenseitigen Lage verschoben, also zum Teil von einander getrennt

werden müssen, so muß die zerteilende Kraft die Kraft, mit der die Teilchen aneinander haften, die Kohäsion, überwinden. Diese muß bei den Flüssigkeiten und Gasen sehr gering sein; denn von einer Kraft, mit der diese Körper einer Zerteilung widerstehen, ist nichts zu bemerken. Den Sitz dieser Kraft müssen wir nun aber in den Körperteilchen suchen und da wir doch nicht gut daran denken können, daß durch das Flüssigwerden eines Körpers seine Teilchen die Fähigkeit einander anzuziehen verlieren, so werden wir zu der Annahme gedrängt, daß eine zweite Kraft alsdann auftrete, welche die Kohäsion zum Teil aufhebt. Diese kann ihren Sitz nicht ebenfalls in den Körperteilchen haben, wir müssen also ihren Träger in den Zwischenräumen derselben suchen, und da sich hier der Lichtäther befindet, so liegt es nahe, diesen als Ursache der abstoßenden Kraft anzusehen. Das Verhalten der gasförmigen Körper spricht noch ganz besonders für die Annahme einer zwischen den Atomen wirkenden abstoßenden Kraft. Denn die Gase verschwinden aus einem Gefäße, sie verflüchtigen sich, wenn man dasselbe nicht sorgfältig nach allen Seiten hin abschließt. Da nun diese abstoßende Kraft, die Expansion, mit der Erwärmung der Körper zunimmt und umgekehrt, so drängt sich uns die weitere Annahme auf, daß sie nur von der Wärme, die Kohäsion nur von der Substanz der Körper abhängt. Dann aber ist uns die Möglichkeit gegeben, zu untersuchen, ob es Körper giebt, bei denen die Kohäsion ganz wegfällt, die Expansion also allein wirkt. Da ja die Expansion nur eine Ausdehnung der Körper bewirken kann, so hätte man nur die Ausdehnung verschiedener Körper in demselben Aggregatzustande zu untersuchen. Sollte es sich daher ergeben, daß die in demselben Aggregatzustande befindlichen Körper die nämliche Ausdehnung zeigten, so würden wir hieraus zu schließen berechtigt sein, daß diese Ausdehnung nur von der Wärme und nicht mehr von der Natur der Körper abhinge. Fände das aber statt, so müßte offenbar die oben gestellte Forderung erfüllt sein, es müßten die Ausdehnungen in demselben Verhältnis stehen wie die zugeführten Wärmemengen.

Die Beobachtung solcher Körper würde also direkt auf die zugeführte Wärmemenge schließen lassen, ein mit ihnen gefülltes Thermometer würde gestatten, dieselbe in Wärmeeinheiten auszudrücken, sie also zu messen. Um ein solches Meßinstrument zu erhalten, haben wir also nur zu untersuchen, ob alle Körper, welche einem und demselben Aggregatzustande angehören, die nämliche Ausdehnung zeigen.

Alle drei Dimensionen eines Körpers werden nun größer, wenn er erwärmt wird. Die Vergrößerung einer dieser Dimensionen nennt man *lineare* Ausdehnung im Gegensatz zu der Vergrößerung aller drei oder seiner *kubischen* Ausdehnung. Um die Ausdehnung verschiedener Körper vergleichen zu können, hat man die Vergrößerung gleicher Längen oder gleicher Volumen zu messen und wählt dazu die Längen- und die Volumeneinheit. Die Zunahme beider Einheiten für einen bestimmten Temperaturunterschied führt den Namen des *linearen* und *kubischen Ausdehnungscoefficienten* innerhalb der gegebenen Temperaturgrenzen. Die Ausdehnung zweier Körper erfolgt also ganz in derselben Weise, wenn ihre Ausdehnungscoefficienten gleich sind. Das findet aber, wie die genauesten Messungen gelehrt haben, nur bei den Gasen statt. Davon, daß die Ausdehnung verschiedener fester Körper verschiedene Werte hat, kann man sich leicht überzeugen, wenn man ein dünnes eisernes und ein ebensolches messingenes Lineal mit ihren breiten Flächen der Länge nach sorgfältig aneinander lötet und den auf solche Weise erhaltenen Stab erwärmt. Derselbe krümmt sich alsdann so, daß das Messinglineal die konvexe Seite bildet. Das Messing muß sich demnach stärker als das Eisen ausdehnen. Daß dies in der That der Fall ist, beweist auch die Anwendung der *Rostpendel* bei Pendel-Uhren, die sehr gleichmäßig gehen sollen. Da dies nur möglich ist, wenn das Pendel stets seine Länge behält, so hängt man es in der Art auf, wie es Fig. 105 zeigt. An dem drehbar aufgehängten Stab, welcher das ganze Pendel trägt, ist ein Querstab angebracht und in diesem finden zwei Eisenstangen a a^1 ihre Stütze.

Mit ihren andern Enden halten sie einen zweiten Querstab, auf dem zwei Messingstangen b b¹ befestigt sind, deren obere Enden wieder zwei Eisenstangen c c¹ tragen. Diese dienen zwei weiteren Messingstangen d d¹ zum Stützpunkt, auf welchen dann mittelst eines dritten Querstückes die eigentliche eiserne Pendelstange ruht. Die Länge der Stangen muß so gewählt sein, daß die Ausdehnung einer eisernen Stange gleich ist derjenigen einer Messingstange, dann wird sich der Pendelkörper um ebensoviel infolge der Ausdehnung des Eisens senken, als er sich infolge der Ausdehnung des Messings wieder hebt. Bei den Chronometern erreicht man denselben Zweck, wenn man die Unruhe derselben aus zwei Halbringen herstellt, die aus Messing und Stahl der Länge nach zusammengelötet worden sind. Bei Erwärmung krümmen sich die Ringe nach außen, bei Abkühlung nach innen, so kann man bewirken, daß trotz dieser Bewegung der Abstand des Schwerpunktes vom Mittelpunkt stets derselbe bleibt.

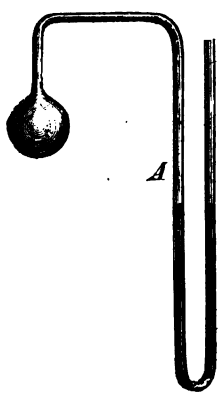
Fig. 105.

Die Verschiedenheit der Ausdehnungscoefficienten der Flüssigkeiten erkennt man, wenn man die Kugel Fig. 103 bei derselben Temperatur bis zu demselben Punkt nach einander mit verschiedenen Flüssigkeiten füllt und zusieht, bis zu welchem Punkte die Flüssigkeiten steigen, während ein gewöhnliches Thermometer, neben welches sie in ein Gefäß mit Wasser gebracht werden, in beiden Fällen dieselbe Temperaturerhöhung angiebt. Die Flüssigkeiten stellen sich dann verschieden hoch. Sperrt man dagegen in dem Apparat, den Fig. 104 zeigt, verschiedene Gase nach einander über Quecksilber ab und verfährt ebenso wie bei der Untersuchung der Flüssigkeiten, so verhalten sich die Gase ganz gleich. Die Gase dehnen sich mithin in demselben Verhältnis aus, wie die Temperatur zunimmt, zwischen ihren Atomen kann also keine

Kohäsion mehr vorhanden sein und das Luftthermometer wird zur Ermittelung der einem Körper zugeführten Wärmemengen dienen können.

Das Luftthermometer ist nun aber für die Anwendungen sehr unbequem, weniger freilich um des Umstandes willen, daß das Volumen des abgesperrten Gases sich auch mit dem Luftdruck ändert, dessen Größe der Barometerstand giebt, als vielmehr deshalb, daß gerade die am häufigsten vorkommende Aufgabe, die Temperatur von Flüssigkeiten zu bestimmen, verlangt, das Instrument ganz in die Flüssigkeit einzutauchen. Auch wenn man ihm die in Fig. 106 dargestellte zweckmäßigere Form giebt, indem man die Röhre A so biegt, daß die Kugel unterhalb des an ihm befindlichen Röhrenstückes zu liegen kommt, und das absperrende Quecksilber sich in dem Uförmig gebogenen Teil von A anstatt in einem besonderen Gefäße befindet, so steht es an Leichtigkeit der Handhabung doch noch weit hinter dem Quecksilberthermometer zurück. Nun hat es aber keine Schwierigkeit das letztere dadurch, daß man es mit dem Luftthermometer vergleicht, auch für die Versuche, die die größte Genauigkeit erfordern, brauchbar zu machen. Man bringt zu diesem Zwecke beide Apparate nebeneinander in ein Gefäß mit Wasser und liest ihre Stände ab, indem man die Temperatur des Wassers langsam erhöht. Man erhält so eine Tabelle, die für jede Angabe des Quecksilberthermometers diejenige, welche das Luftthermometer unter gleichen Umständen hätte ablesen lassen, giebt, und kann also auch aus den Ständen des Quecksilberthermometers stets auf die zugeführten oder abgegebenen Wärmemengen eines Körpers schließen. Zwischen Schmelzpunkt und Siedepunkt darf man sogar, wenn es nicht auf die größte Genauigkeit ankommt, die An-

Fig. 106.



gaben des Queckſilberthermometers ohne Korrektion beibehalten. Denn die größte Abweichung, welche die beiden Apparate und zwar bei 50° C zeigen, beträgt nur $^1/_2$° C.

Durch die verhältnismäßig kleine Mühe der Vergleichung des Queckſilberthermometers mit dem Luftthermometer läßt ſich alſo das erſtere zu einem ſehr vollkommenen Wärmemeſſer herrichten, und ſo iſt es als durchaus gerechtfertigt zu bezeichnen, daß man das Queckſilberthermometer ſo viel wie möglich zu vervollkommnen geſucht hat. Früher ſtellte man es ſo her, daß man an eine gleichmäßig cylindriſche, enge Röhre mit dem Munde eine Kugel anblies, wobei freilich in Röhre und Kugel Feuchtigkeit hineinkam, die nach der Füllung des Thermometers mit Weingeiſt oder Queckſilber durch anhaltendes Auskochen wieder entfernt werden mußte. Außer dieſem Übelſtande hatte die Anfertigungsmethode noch die weiteren im Gefolge, daß man ſehr enge Röhren nicht verwenden und daß man das Thermometer mit Kugel nie von oben durch einen Stopfen bringen konnte, der mit einem Loch zur Aufnahme der Röhre verſehen war. Deshalb macht man jetzt die feineren Thermometer ſo, daß man an ein ganz enges Rohr a Fig. 107 ein cylindriſches Gefäß b anſchmilzt, das enge Rohr aber nach Anfüllung mit Queckſilber in ein weiteres c einführt und dieſes wieder auf b durch Anſchmelzen befeſtigt. Nachdem man nun einen Papier- oder Milchglasſtreifen mit aufgetragener Skala in das Rohr c geſchoben hat, wird c ſo zugeſchmolzen, daß die Skala gegen das Rohr nicht mehr verſchiebbar iſt. Die Füllung mit Queckſilber geſchieht in der Art, daß man das obere Ende des noch leeren offenen Rohres a durch eine Öffnung im Boden eines Gefäßes ſteckt, welches mit trocknem, heißem Queckſilber gefüllt iſt, dann die Luft durch Erwärmen des unteren Gefäßes nach und nach austreibt und bei folgender Abkühlung des Gefäßes nunmehr durch den Luftdruck das Queckſilber durch die

Fig. 107.

Röhre in das Gefäß preſſen läßt, dies aber ſo oft wiederholt, bis die Luft aus dem Thermometer vertrieben iſt. Ein leichtes Auskochen vertreibt auch den letzten Reſt und man ſchmilzt dann das Thermometer oben zu, während das Queckſilber noch kocht. Ehe man nun die feſten Punkte beſtimmt, muß das ſoweit fertige Inſtrument Monate lang liegen bleiben, weil der Luftdruck nach und nach das Glasgefäß zuſammenpreßt und dadurch das Queckſilber des Thermometers noch zum Steigen bringt. Erſt wenn keine Änderung in ſeinem Stande mehr zu beobachten iſt, beſtimmt man die beiden feſten Punkte, indem man das Thermometer einige Stunden in ſchmelzendem Eiſe ſtehen läßt, den Stand des Queckſilbers bezeichnet und es darauf in ein Gefäß mit ſiedendem Waſſer bringt, ſo daß ſein Gefäß 1 bis 2 cm über den Waſſerſpiegel zu ſtehen kommt und nun nachdem ſein Stand konſtant geworden iſt, auch den Siedepunkt beſtimmt, endlich die Skala aufträgt. Auch bei einem fertigen Thermometer thut man gut, dieſe beiden Punkte von Zeit zu Zeit zu kontrolieren. Für die gewöhnlichen Inſtrumente zur Beobachtung der Lufttemperatur iſt es, wenn man genaue Angaben haben will, nur notwendig, wenigſtens ihre Nullpunkte von Zeit zu Zeit zu prüfen, indem man ſie in geſtoßenes, einen Holzeimer füllendes Eis ſoweit hinein ſteckt, daß man den Stand des Queckſilberfadens gerade noch ableſen kann, und dafür ſorgt, daß die Temperatur der Umgebung ſich nur wenig über den Schmelzpunkt des Eiſes erhebt. Man wird alsdann den Nullpunkt gewöhnlich etwas fehlerhaft finden und muß demgemäß alle Ableſungen korrigieren. Iſt der Nullpunkt z. B. auf $1^1/_2{}^0$ beſtimmt, ſo muß von jeder Beobachtung $1^1/_2{}^0$ abgezogen werden, liegt er bei $-\,^1/_2{}^0$, ſo iſt $^1/_2{}^0$ jeder Ableſung zuzuzählen. Auch das unrichtigſte Thermometer kann unter Anbringung dieſer Korrektion doch genaue Reſultate geben.

Das Queckſilber hat vor dem Weingeiſt zunächſt den großen Vorzug, daß es, wie wir bereits ſahen, raſcher und zwar ſeiner ganzen Menge nach, die zugeführte Wärme aufnimmt oder wieder abgiebt als der Weingeiſt. Ein weiterer Vorzug beſteht darin,

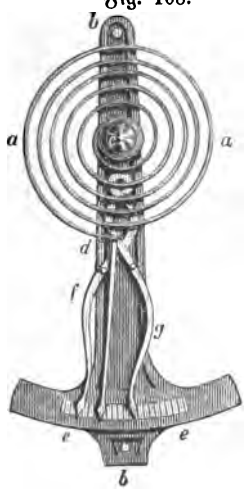
daß es leichter rein hergestellt und vermöge seiner Undurchsichtigkeit auch im engsten Röhrchen deutlich gesehen werden kann, ein dritter endlich, daß es sich bei viel höherer Temperatur in Dampf verwandelt als Weingeist und sich demnach besser auch zur Bestimmung hoher Temperaturen eignet. Dagegen friert es bei — 30° und kann für so niedere Temperaturen demnach nicht mehr als thermometrische Substanz dienen, während der Weingeist hierzu noch tauglich ist, indem er auch bei den niedrigsten Temperaturen, welche man erreicht hat, flüssig bleibt.

Aber auch feste Körper hat man als thermometrische Substanzen benutzt, und zwar namentlich für solche Thermometer, welche ihre Angaben in bestimmten Zeiträumen fixieren sollen, für sogenannte registrierende Instrumente. Diese haben in neuerer Zeit für meteorologische Beobachtungen die größte Bedeutung gewonnen. Ein jeder Stab, dessen eines Ende festliegt, während das freibewegliche andere einen Schreibstift trägt, ist dazu zu brauchen, indem man unter dem Stifte hin durch ein Uhrwerk einen Papierstreifen ziehen läßt, auf dem der Stift schreibend ruht. Abgesehen von manchen Ungenauigkeiten, die ein solcher Apparat haben würde, müßte der Stab aber sehr lang sein, wenn seine Angaben einigermaßen beobachtbar sein sollen. Wenn man nun auch den Stab spiralförmig aufrollen oder auf sonstige Weise dafür sorgen könnte, daß die Länge des Apparates viel geringer als die des Stabes sein könnte, so wird derselbe doch immer unbeholfen.

Um diesen Übelstand zu vermeiden, hat man die stärkere oder geringere Krümmung, die ein aus zwei Metallamellen zusammengelöteter Stab bei sich ändernder Temperatur erfährt, benutzt, um kompendiöse und empfindliche Apparate zu konstruieren, die man leicht zum Registrieren ihrer Angaben einrichten kann. Als Repräsentanten dieser sogenannten Metallthermometer führen wir das von Hermann und Pfister in Bern hier an. Der aus Messing und Stahl zusammengelötete Streifen a Fig. 108 ist mit seinem einen Ende c auf einer Platte b befestigt, die an

eine Wand angeschraubt wird. Da das Messing die innere Seite der Spirale bildet, so rollt sich dieselbe bei steigender Temperatur auf und umgekehrt. Ihr anderes Ende d trägt einen geraden Zeiger, welcher über der die Grade angebenden Skala e e spielt, die natürlich durch Vergleichung mit dem Quecksilberthermometer aufgetragen werden muß. Der Stand des Zeigers erlaubt in jedem Augenblick die Temperatur der Luft abzulesen. Soll das Instrument zum Registrieren eingerichtet werden, so bleibt die Skala weg und der Zeiger erhält einen Zeichenstift, der auf einem sich darunter her bewegenden Papierstreifen ohne Ende eine Linie zieht, welche bei steigender Temperatur nach links, bei fallender nach rechts von der mittleren Lage des Zeigers sich entfernt, oder man bringt eine Stahlspitze an dem Zeiger an, die jedesmal durch einen Elektromagnet auf das Papier gedrückt wird, wenn in bestimmten Intervallen ein Uhrwerk einen elektrischen Strom schließt und dadurch den Elektromagneten magnetisch macht ꝛc.

Fig. 108.

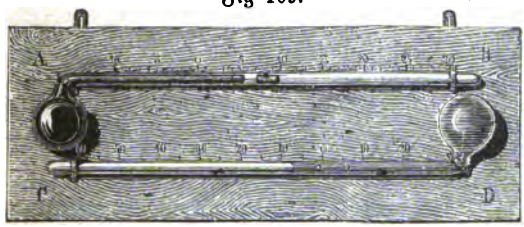


Das Instrument kann aber auch eine zweite für meteorologische und medizinische Zwecke wichtige Aufgabe lösen, indem es die höchste und niedrigste Temperatur angiebt, welche in einem bestimmten Zeitraume eingetreten ist. Dazu ist es mit zwei weiteren Zeigern f und g versehen, die mit mäßiger Reibung auf der Achse c aufsitzen und zwei kleine Stiftchen tragen, mittelst welcher sie der mittlere, die Temperatur angebende Zeiger d vor sich her schieben kann. Kehrt dann d seine Bewegung um, so läßt er die beiden andern Zeiger stehen und diese geben mithin seine äußersten Stellungen, d. i. die Maximal- und Minimaltemperaturen in einem bestimmten Zeitraum an. Am Schlusse desselben hat man

nur die Zeiger f und g wieder zusammenzuschieben, wenn man von neuem beobachten will.

Demselben Zweck dienen der Thermometrograph von Rutherford*) und das Sixthermometer. Der erstere, Fig. 109, besteht aus einem Quecksilberthermometer A B und einem Weingeistthermometer C D. Beide sind so auf einem Brette befestigt, daß ihre Gefäße auf verschiedenen Seiten desselben liegen, das Brett aber muß so aufgehängt werden, daß die Thermometerrohre in horizontale Lage kommen. Vor dem Quecksilber in A B liegt ein Stahlstäbchen, welches, indem es das Quecksilber vor sich herschiebt, an der äußersten Stelle liegen bleibt, die dieses erreicht. Es läßt also das Maximum beobachten. In dem Weingeist dagegen befindet sich auch an seiner Oberfläche, aber innerhalb liegend, ein Glasstäbchen, welches der sich zusammenziehende Weingeist mitnimmt, während der sich ausdehnende es liegen läßt. Dadurch wird also das Minimum der Temperatur fixiert. Neigt man nach vollendeter Beobachtung das Brett mit den Thermometern, so daß B D höher zu liegen kommt, als A C, so sinken beide Stäbchen wieder herab und das Instrument ist für eine neue Beobachtung eingerichtet. Das Sixthermometer, von Six**) 1794 angegeben, zeigt Fig. 110. Es ist ein Weingeistthermometer, um dessen Gefäß A das Rohr B herumgebogen ist. Dasselbe ent-

Fig 109.



*) Daniel R., geb. 1749 in Edinburgh, war seit 1786 Prof. in Edinburgh, wo er 1819 starb.

**) James S., Esquire in Canterbury, starb 1793.

hält in seinem unteren Uförmigen Teil C D E Queckſilber, ſein oberes Ende iſt zu einem Gefäß F erweitert, in dem ſich außer dem Weingeiſt auch noch Weingeiſtdämpfe befinden. Oberhalb der beiden Queckſilberkuppen befinden ſich zwei Glasſtäbchen, in die kleine Magnetſtäbchen eingeſchmolzen ſind und welche mittelſt eines angebundenen Pinſelhaares ſich gegen die Glaswand ſtemmen. Das nach der einen oder anderen Seite ſich bewegende Queckſilber ſchiebt dieſe Glasſtäbchen vor ſich her und läßt ſie, wenn es wieder zurückgeht, an ihrem Orte liegen.

Fig. 110.

Die Bewegung des Queckſilbers aber bewirkt der Weingeiſt, der erwärmt C herab und E emportreibt, ſich abkühlend aber E hebt und C ſenkt. Das Stäbchen über E giebt alſo die Maximal-, das über C die Minimaltemperatur an. Soll nach der Ableſung das Inſtrument für die neue Beobachtung wieder eingerichtet werden, ſo zieht man beide Glasſtäbchen mittelſt eines kleinen Hufeiſenmagnetes wieder bis auf die Queckſilberſpiegel herab.

Dies Inſtrument iſt ſchlecht zu transportieren; für Ärzte, die nur Maximaltemperaturen zu beobachten haben, eignet ſich deshalb beſſer ein gewöhnliches Thermometer, in deſſen Rohr das Glasſtäbchen mit Magnet und Pinſelhaar gebracht iſt. Solche Thermometer können aber ihres weiten Rohres wegen nie ſehr empfindlich ſein. Zweckmäßiger als dieſes Pinſelthermometer iſt für ärztliche Beobachtungen das maximierte oder Schleuderthermometer nach Walferdin*), in dem ein kleiner Teil des Queckſilberfadens durch ein zwiſchengebrachtes Luftbläschen von dem Hauptfaden getrennt iſt, der es emportragend fortſchiebt, beim Zurückgehen

*) François Hippolyte W., geboren 1795 in Langres, war 1848 Chef aux Douanes, nachher Privatmann in Paris. Er ſtarb 1863.

aber liegen läßt. Indem man das Instrument in der Hand hin- und herschleudert, bringt man den kurzen Faden wieder mit dem langen in Berührung.

Mit dem Quecksilberthermometer kann man auch die feinsten Temperaturunterschiede erkennen, doch muß dann das Gefäß des Thermometers verhältnismäßig groß, der Durchmesser des Rohres dagegen möglichst klein sein. Mit solchen Apparaten lassen sich Hundertstel Grade noch bequem ablesen, welche Genauigkeit für wissenschaftliche Untersuchungen hier und da gefordert wird. Doch muß die Erwärmung eine gewisse Zeit hindurch dauern, weil das Quecksilber seiner ganzen Masse nach erst die Temperatur annehmen muß, ehe der Stand des Fadens ein fester werden kann. Für gewisse Zwecke ist es aber nötig, einen Apparat zu haben, der erwärmt, sofort die Stärke dieser Erwärmung angiebt. Dazu benutzte Nobili*) die von Seebeck**) 1822 entdeckte Eigenschaft der Wärme, in einem Metallring, der aus zwei verschiedenen Metallen zusammengesetzt ist, einen elektrischen Strom zu erregen, wenn die eine Berührungsstelle der Metalle wärmer ist als die andere. Am stärksten fallen diese Ströme aus, wenn man den Streifen aus Wismuth und Antimon zusammenlötet und zwar geht hier der Strom in der wärmeren Lötstelle vom Wismuth zum Antimon. Lötet man nun, wie Fig. 111 zeigt, eine Reihe von Wismuthstäbchen (durch — dargestellt) und Antimonstäbchen (=) aneinander und erwärmt die Lötstellen bei a, so cirkuliert ein Strom in der Richtung der Pfeile durch die Kombination und den an c und b befestigten Draht, der viel stärker ist als ein nur durch eine Kombination Wismuth-Antimon hervorgerufener. Noch stärker wird er, wenn man eine Reihe solcher Kombinationen nebeneinander setzt und nun die sämtlichen

*) Leopoldo N., geb. 1784 in Trassilico bei Reggio, war erst Artillerie-Kapitän, dann Professor in Florenz, wo er 1835 starb.

**) Thomas Joh. S., geb. 1770 in Reval, lebte als Privatmann in Jena, Baireuth und Nürnberg, wurde 1818 Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Berlin, wo er 1831 starb.

Lötstellen a erwärmt. Um zu verhüten, daß die Stäbchen gegenseitig in Berührung kommen, was zur Folge haben würde, daß der Strom durch die Berührungsstelle, aber nicht durch den Verbindungsdraht geht, umgießt man sie mit Harz und bringt das Ganze in ein Messinggehäuse, aus welchem zu beiden Seiten nur die mit Ruß geschwärzten Lötstellen der Stäbchen herausragen. Auf diese Weise ist die in Fig. 112 gezeichnete Thermosäule hergestellt. Das Messinggehäuse wird von einem Elfenbeinband P umfaßt, in welches zwei Schräubchen x und y so eingesetzt sind, daß sie das Gehäuse metallisch nicht berühren. Da an x und y die Enden der Kombinationen Antimon-Wismuth gehen und in diesen der Draht befestigt wird, durch den der Strom gehen soll, so ist diese Art

Fig. 111.

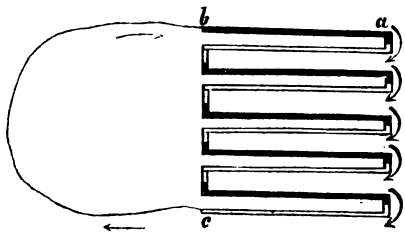
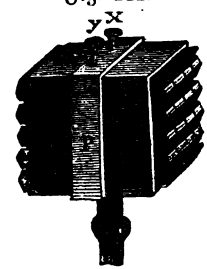


Fig. 112.



der Befestigung notwendig, weil sonst der Strom durch das Gehäuse direkt von x nach y gehen würde. Den x und y verbindenden Draht leitet man nun in vielfachen Windungen um eine Magnetnadel, die, sowie der Strom die Windungen durchläuft, aus ihrer gewöhnlichen Stellung von Nord nach Süd abgelenkt wird. Ein mit ihr verbundener Zeiger läßt ihre Ablenkung im Winkelmaß messen und die Elektricitätslehre giebt dann Mittel an die Hand, die Ablenkung der Nadel dieses Apparats, des Galvanometers, in Grade der Thermometerskala zu übertragen.

Zur Messung der hohen Temperaturen, wie sie in Schmelzöfen ꝛc. vorkommen, kann man die Ausdehnung der flüssigen Körper nicht mehr benutzen, da dieselben alsdann verdampfen würden.

Man ist demnach auf die Anwendung der festen und gasförmigen Körper bei der Konstruktion der Thermometer für höhere Temperaturen, der Pyrometer, angewiesen. Als solches kann das Luftthermometer dienen, wenn man die Kugel desselben und den im Ofen noch liegenden Teil des Rohres aus Platin oder Porzellan macht und in genügender Entfernung von dem Ofen ein Uförmiges Glasrohr zur Aufnahme des die Luft absperrenden Quecksilbers ankittet. Auch die Ausdehnung einer in eine Porzellanhülse eingeschlossenen Eisenstange hat man benutzt, um die Temperatur des Ofens, in den sie mit ihrer Umhüllung hineingelegt ist, zu messen, indem man das eine ihrer Enden, wie bei dem in Fig. 102 abgebildeten Apparate, auf den kurzen Arm eines Hebels wirken ließ, dessen anderer als Zeiger diente. Das zuverlässigste, wenn nicht einzig brauchbare Pyrometer ist aber das von William Siemens*), welches aus einem Platindraht besteht, durch den ein elektrischer Strom cirkuliert. Jeder in einen solchen eingeschaltete Draht hat die Eigenschaft, den elektrischen Strom zu schwächen, was sich daran zeigt, daß nach Einschaltung des Drahtes die durch den Strom verursachte Ablenkung der Galvanometernadel geringer ist als vorher. Man stellt sich die Erscheinung so vor, als setze der Draht dem Strome einen Widerstand entgegen, und dieser Widerstand wächst mit der Temperatur des Drahtes. Derselbe muß demnach nur in den Ofen gebracht und die Vergrößerung des Widerstandes, die seine Erhitzung bewirkt, angegeben werden. Siemens hat gezeigt wie man alsdann daraus auf die Temperatur schließen kann.

Strahlende Wärme.

Ausgerüstet mit den im vorigen Abschnitt beschriebenen Thermometern können wir uns nunmehr der zweiten Aufgabe zuwenden, welche uns beim Beginne unserer Untersuchungen über die

*) Karl Wilh. S., geb. 1822 in Lenthe bei Hannover, ging 1842 nach England, wo er sich später als Civilingenieur niederließ. Ist jetzt Chef der Firma Siemens Brothers in London.

Wärme entgegentrat, nämlich der Beantwortung der Frage, ob es verschiedene Arten von Wärme giebt. Hierzu werden wir zunächst die Lichtstrahlen verschiedener Farbe auf ihre Wärmewirkung zu prüfen haben.

Derartige Prüfungen sind vielfach vorgenommen zuerst von William Herschel, welcher ein kleines Thermometer hinter einem Spalte aufstellte und die verschiedenen Strahlen eines in gewöhnlicher Weise entworfenen Sonnenspektrums auf diesen Spalt fallen ließ, später von Melloni*), welcher statt des Thermometers die Thermosäule anwandte und dadurch viel genauere Resultate erhielt. Es ergab sich, daß den Strahlen aller Farben bis zu den ultravioletten Wärmewirkung zukam, daß dieselbe jedoch um so größer wurde, je weniger brechbar die Strahlen waren, ja daß sie noch wuchs, wenn man den Meßapparat in Stellen des Spektrums brachte, die jenseits des Rot lagen. Die größte Wärmewirkung wurde in einer Entfernung vom Ende des Spektrums beobachtet, die etwa gleich dem Abstand der grünen Strahlen von den äußersten roten ist, dann nimmt dieselbe ab, anfangs rasch, nachher langsamer, doch ist sie noch in einem solchen Abstande vom roten Ende des Spektrums bemerkbar, daß die Länge dieses unsichtbaren Spektrums diejenige des sichtbaren noch übertrifft. Ebenso wie es ultraviolette Strahlen giebt, giebt es demnach auch **ultrarote** oder **Wärmestrahlen**, die immer unsichtbar sind. Auch die dunkle Wärme pflanzt sich demnach wie das Licht fort und diese Art ihrer Ausbreitung nennen wir Fortpflanzung durch **Strahlung**. Die Wärmestrahlen, die wir mithin annehmen müssen, haben dann mit den Lichtstrahlen die weitere Ähnlichkeit, daß sie die verschiedenste Brechbarkeit zeigen und nur durch diese sich von einander unterscheiden. Nun muß Sonnen-Licht und -Wärme, um zu uns zu gelangen, eine dicke Luftschicht, und um in das Spektrum auseinandergelegt zu

---

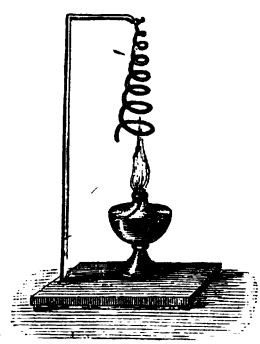
Macedonio M., geb. 1798 in Parma, Prof. daselbst von 1824—1831 flüchtete dann in Folge seiner Beteiligung an der Revolution nach Frankreich, wo er bis 1839 lebte, ward dann Direktor des Konservatoriums der Künste und Gewerbe und starb 1854 in Portici.

werden, das Glas des Prismas und der Linse (s. S. 142) durchdringen. Da wir aber wissen, daß das Licht von den verschiedensten Substanzen in der verschiedensten Weise absorbiert wird, so ist für die Wärme dasselbe zu erwarten. Wollen wir demnach die unsichtbaren ultraroten Strahlen in ähnlicher Weise wie die Lichtstrahlen studieren, so müssen wir uns zunächst nach Stoffen umsehen, die sich gegen die Wärme ebenso verhalten wie die durchsichtigen gegen das Licht, nach Stoffen, welche wir durchwärmig oder diatherman nennen.

Die Durchwärmigkeit oder Diathermansie haben namentlich Melloni und Knoblauch*) untersucht. Sie benutzten dazu Strahlen, welche von vier verschieden heißen und verschieden stark

Fig. 113.

Fig. 114.



leuchtenden Wärmequellen ausgingen. Die heißesten und hellsten Strahlen erhielten sie mittelst der Flamme der Locatelli'schen Lampe, Fig. 113, eines kleinen Ollämpchens mit viereckigem Docht und Reflektor, jedoch ohne jeden Glascylinder. Weniger groß war die Hitze und Leuchtkraft einer Platinspirale, Fig. 114, welche durch eine darunter gestellte Spirituslampe glühend gehalten wurde. Gar nicht mehr leuchtete die von einem Kupferblech,

*) Karl Herm. Kn., geb. 1820 in Berlin, war erst Prof. in Marburg, ist jetzt Prof. in Halle.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY

Fig. 115 ausgesandte Wärme, welches nach drei Seiten umgebogen, einen Kasten darstellte, unter welchem die Spirituslampe brannte, und ebensowenig diejenige Wärme, welche ein hohles Messinggefäß von Würfelform, der Leslie'sche*) Würfel, Fig. 116, in dem Wasser mittelst einer untergestellten Spirituslampe im Sieden gehalten wurde, aussandte. Um mittelst dieses Gefäßes zugleich zu untersuchen, ob die Ausstrahlung der Wärme von der verschiedenen Beschaffenheit der Oberfläche des strahlenden Körpers abhänge, war die eine Seite desselben poliert, die andere gefeilt, die dritte grob geritzt, die vierte aber mit weißer Farbe angestrichen. Die von diesen Wärmequellen ausgehenden

Fig. 115.

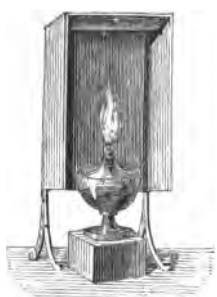


Fig. 116.

Strahlen fielen auf die Thermosäule, von welcher die Drähte zum Galvanometer gingen, dessen Stand zunächst beobachtet wurde, während die Säule durch einen Schirm vor der Strahlung der Wärmequelle geschützt war. Wurde dann dieser Schirm plötzlich weggezogen, so schug die Galvanometernadel aus und ihr Ausschlag ließ auf die Erwärmung der Thermosäule schließen. Es ergab sich zunächst, daß, wie zu erwarten war, die heißere dieser Wärmequellen auch mehr Wärme ausstrahlte.

Um zu untersuchen, ob und in welchem Grade verschiedene Substanzen die Wärme absorbieren, wurden Platten aus den-

*) John L., geb. 1766 in Largo in Schottland, wurde, von mehrfachen Reisen zurückgekehrt, Prof. in Edinburgh. Er starb 1832 in Coates bei Largo.

selben verfertigt und diese so vor die Wärmequelle aufgestellt, daß die Strahlen, um auf die Thermosäule zu fallen, diese Platten durchsetzen mußten. Man beobachtete zunächst den Ausschlag, wenn keine Platte in die Strahlen eingeschaltet war, und dann, wenn dieselben durch eine Platte der betreffenden Substanz zu der Thermosäule gelangten.

Aus diesem Ausschlag konnte man den relativen Verlust an Wärme, welchen die eingeschaltete Platte hervorrief, berechnen. Es zeigte sich, daß das Verhalten der Körper gegen die Wärme ein ganz anderes war, als gegen das Licht. Steinsalz z. B. ließ von den Strahlen aller Wärmequellen 92 % durch, Spiegelglas von der ersten 39, von der letzten gar keine, Alaun, Kandiszucker und Eis dagegen von der ersten eine ganz geringe, von den drei anderen gar keine Wärme mehr, und doch sind alle diese Körper durchsichtig. Andererseits ließen ganz durchsichtiger Bergkrystall und ganz undurchsichtiger Rauchtopas genau dieselbe Menge Wärmestrahlen durch sich hindurch. Den geringen Wärmeverlust bei dem Durchgang der Strahlen durch Steinsalz könnte man nun auf zweierlei Arten erklären, entweder daß Steinsalz alle Strahlen gleichmäßig schwächt oder daß es einige vollständig auslöscht, alle anderen aber ungeschwächt durchläßt. Masson*) und Jamin**) glaubten die erste Ansicht annehmen und die 8 % Verlust durch unregelmäßige Reflexion an der Oberfläche erklären zu müssen, da sie den nämlichen Lichtverlust beim Durchgange farbiger Strahlen durch durchsichtige Glasplatten beobachtet hatten. Indessen erwies sich die Diathermansie des Steinsalzes später nicht so vollkommen, wie man anfangs geglaubt hatte, und als Balfour-Stewart und namentlich Magnus***) nach-

*) Antoine Philibert M., geb. 1806 in Auxonne, Dep. Cotes d'Or, war Prof. zu Paris, wo er 1860 starb.

**) Jamin, Jules Celestin, geb. 1818 in Termes, Dep. Ardennes, ist Prof. in Paris.

***) Heinr. Gust. M., geb. 1802 in Berlin, war bis zu seinem 1870 erfolgtem Tode Prof. daselbst.

wiesen, daß Steinsalz ganz undurchlässig für Wärmestrahlen ist, welche eine erhitzte Steinsalzplatte aussendet, so konnte man dies nur so erklären, daß das Steinsalz, wie der Natriumdampf, gerade Strahlen von der Brechbarkeit zurückhält, die es selbst erhitzt aussendet. Für alle anderen Strahlen ist also das Steinsalz vollständig durchwärmig und wir dürfen es überall da verwenden, wo wir einen solchen Körper brauchen. Ganz vereinzelt steht übrigens diese merkwürdige Thatsache nicht da, denn Bunsen hat gefunden, daß zwei sehr seltene Sauerstoffverbindungen, die Erbiumerde und das Didymoxyd, obwohl beides feste Körper sind, sich ebenso wie farbige Dämpfe gegen das Licht verhalten, wie das Steinsalz gegen die Wärme, und infolge dessen glühend Licht ausstrahlen, welches aus einzelnen hellen Linien besteht.

Lassen wir nun Licht auf ein farbiges, z. B. rotes Glas fallen, so werden alle Strahlen außer den roten und einigen benachbarten absorbiert. Eine zweite Platte absorbiert noch einige Strahlen an der Grenze der roten, eine dritte dagegen läßt das durch die zweite gegangene Licht nunmehr ungeschwächt durch und ebenso verhalten sich alle folgenden. Um somit Platten auf ihr analoges Verhalten gegen die Wärme zu prüfen, haben wir nur Wärmestrahlen durch eine, zwei, drei ꝛc. hindurchzuschicken und zuzusehen, ob jedesmal, wenn man eine weitere Platte in dieselben einschaltet, eine Verringerung der hindurchgegangenen Wärme zu beobachten ist, oder ob nach Einschaltung einer gewissen Anzahl Platten die folgenden keinen Einfluß mehr haben. Bei den weitaus meisten Körpern findet nun das letztere statt, sie müssen also auf die Wärmestrahlen eine auswählende Absorption ausüben, und mithin sich ebenso gegen sie verhalten, wie die transparenten farbigen Körper gegen das Licht. Solche Körper nennt man wärmefarbig oder thermochroisch, die sie kennzeichnende Eigenschaft Wärmefarbe oder Termochrose. Körper wie Steinsalz, welche nur Strahlen einer bestimmten Brechbarkeit absorbieren, heißen auch wohl monothermisch.

Ebenso, wie die festen Körper zeigen die Flüssigkeiten ver-

schiedene Wärmefarbe und demgemäß Durchsichtigkeit für die Wärme. Man erhielt dies Resultat, indem man die Flüssigkeiten in ein Rohr brachte, welches auf beiden Seiten durch aufgesetzte Steinsalzplatten geschlossen war, und fand, daß bei den meisten bis zu einer gewissen Dicke mit derselben die Absorption zunahm. So ist Schwefelkohlenstoff für Strahlen, die von der glühenden Platinspirale ausgehen, vollständig diatherman, Chloroform etwas weniger, viel weniger Äther und Alkohol, Wasser aber ist fast undurchwärmig für diese Strahlen. Überhaupt läßt Wasser alle leuchtenden, aber keine dunkelen Wärmestrahlen hindurch, eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff dagegen alle dunkeln, während sie die leuchtenden zurückhält. Beide Körper setzen uns daher in den Stand, die leuchtenden von den dunkeln Strahlen zu trennen.

In derselben Weise hat man die Gase geprüft. Trockene Luft verhält sich fast dem leeren Raume gleich, d. h. sie absorbiert so gut wie gar keine Strahlen; hierin liegt die Rechtfertigung dafür, daß wir von der Absorption auf die sie durchlaufenden Strahlen ganz abgesehen haben. Andere Gase absorbieren die Wärme stärker, so Chlor, Kohlensäure, schwefelige Säure, Leuchtgas und vor allen Ammoniakgas, durch welches etwa nur der zwölfhundertste Teil der Wärme geht, welchen unter sonst gleichen Umständen die Luft durchläßt. Da man nun weiter fand, daß nur in dünneren Schichten die Menge der durchgelassenen Wärme von der Dicke der Schicht abhing, in dickeren nicht, so sind auch die Gase wärmefarbig.

Es blieben nur noch die Dämpfe auf ihre Durchwärmigkeit zu untersuchen. Ob dieselben und namentlich der so häufig in der Luft enthaltene Wasserdampf Wärme in stärkerem Maße absorbiert als Luft, ist Gegenstand eines heftigen Streites geworden. Tyndall*) hatte gefunden, daß der Wasserdampf sich in dieser Hinsicht genau so verhalte wie Wasser, nämlich den

*) John T., geb. 1820 in London, Prof. in London.

bei weitem größten Teil der auf ihn fallenden Wärmestrahlen zurückhalte. Magnus dagegen beobachtete, daß er ebenso durchwärmig sei wie die Luft. Der Streit wurde dadurch zu Gunsten von Magnus entschieden, daß dieser nachwies, weshalb Tyndall zu dem fehlerhaften Resultat gelangt war. Es hatte sich nämlich bei seinen Versuchen an den Wänden des Messingrohres, welches die Gase enthielt, viel Wasser niedergeschlagen, welches einen großen Teil der Wärme, die bei trockenem Rohre nach ihrer Reflexion von der inneren Wand desselben auf die Thermosäule gelangte, absorbiert hatte. Infolge dieser, von Magnus Vaporhäsion genannten Erscheinung war der Wert, den Tyndall bei Röhren, welche mit Wasserdampf gefüllt waren, erhalten hatte, viel zu klein gewesen und in der That wurde die Menge der durchgelassenen Wärme sofort viel größer, als die Wände der Röhre erhitzt und so der Niederschlag von Wasser verhindert wurde. Daß aber die Wärme wie das Licht reflektiert wird, davon werden wir uns sogleich überzeugen. Wasser und Wasserdampf verhalten sich also ganz verschieden, während jenes eine verhältnismäßig sehr große Menge von hindurchgeschickten Wärmestrahlen zurückhält, läßt dieser fast alle hindurchgehen.

Nachdem wir so gesehen haben, daß wir die Absorption der Wärmestrahlen durch die Luft wegen ihrer Geringfügigkeit vollständig vernachlässigen dürfen, daß wir ferner in dem Steinsalz einen so gut wie durchwärmigen Körper besitzen, können wir uns zu der Entscheidung der Frage wenden, ob die Wärmestrahlen alle Eigenschaften der Lichtstrahlen zeigen.

Läßt man die von einer Wärmequelle ausgehenden Strahlen auf einen Spiegel von schwarzem Glas fallen und untersucht nun, indem man die Thermosäule um den Spiegel so herumbewegt, daß von ihm ausgehende Strahlen immer die Lötstellen der Wismuth- und Antimonstäbchen treffen können, ob der Spiegel Wärme zurückstrahlt, so findet man, daß die Wärmestrahlen, die ohne Einschaltung des Spiegels die Galvanometernadel zur Ablenkung bringen, wenn sie geradlinig fortschreiten, jetzt dasselbe

an einer Stelle bewirken, wohin sie nur gelangt sein können, wenn sie von dem Spiegel nach dem Reflexionsgesetz zurückgestrahlt werden. Daß die Wärmestrahlen reflektiert werden, beweist ferner die Wärmewirkung der auf einen Hohlspiegel fallenden Sonnenstrahlen in dessen Brennpunkt, beweist endlich der folgende Versuch mit zwei, am besten aus Metall verfertigten Hohlspiegeln. Stellt man dieselben einander gerade gegenüber, so daß ihre Brennpunkte und Scheitel in eine gerade Linie fallen, so werden die Lichtstrahlen, die von dem Brennpunkte des einen Spiegels kommen und parallel auf den zweiten fallen, nach dem Brennpunkt desselben reflektiert werden müssen, wenn Reflexion bei Wärme überhaupt stattfindet. Bringt man nun in den Brennpunkt des einen ein mit glühenden Kohlen gefülltes Drahtkörbchen, in den des andern ein wenig Zunder, so entzündet sich dieser, wenn die Kohlen kräftig angefacht werden. Die Wärmestrahlen sind mithin reflektiert worden. Stellt man anstatt eines Spiegels aus schwarzem Glas ein Steinsalzprisma in den Weg der Wärmestrahlen und untersucht nun ebenso mit der Thermosäule, ob und wie die Strahlen durch die Wirkung des Prismas abgelenkt werden, so ergiebt sich, daß dies genau nach dem Gesetz, nach welchem das Licht gebrochen wird, geschieht. Die Wärme ist also auch brechbar, was wir freilich schon aus der Verwendbarkeit jeder Sammellinse als Brennglas schließen mußten. Daß sie aber auch diffus reflektiert werden kann, haben mannigfache Versuche von Melloni und Knoblauch bewiesen. So nahm, um nur einen derselben anzuführen, der letztgenannte Forscher einen großen Leslie'schen Würfel, der mit Wasser von der Temperatur der Umgebung gefüllt war, ließ Wärmestrahlen darauf fallen und fand dann, daß seine Thermosäule Erwärmung anzeigte, wenn er sie in die Nähe des Würfels brachte und irgendwo der bestrahlten Seite desselben gegenüber aufstellte. Da während der äußerst kurzen Zeit, die der Versuch in Anspruch nahm, Erwärmung des Würfels nicht stattfinden konnte, so konnte die Wärmewirkung auf die Thermosäule nicht durch

Strahlung, sondern nur durch Reflexion verursacht werden. Die diffuse Reflexion zeigt sich verschieden stark, je nach dem Stoffe des reflektierenden Körpers und der Art der reflektierten Strahlen. Die diffus reflektierenden Körper verhalten sich also gegen die Wärme ebenso, wie die opaken Körper gegen das Licht. Man wird ihnen also Wärmefarbe zusprechen müssen. Metalle mit blanken Oberflächen reflectieren Strahlen aller Art gleichmäßig, sie besitzen also Weiß als Wärmefarbe. Außer Reflexion und Brechung zeigt nun aber die Wärme auch sämtliche andere Erscheinungen, die wir beim Lichte wahrnehmen konnten.

Interferenz und Beugung der Wärmestrahlen beobachteten Fizeau*) und Foucault, als sie ein mit Alkohol gefülltes, sehr empfindliches Thermometer, dessen Gefäß jedoch nur einen Durchmesser von etwa 1 mm hatte, anstatt des Schirmes in die von den Fresnel'schen Spiegeln reflektierten Strahlen einer Wärmequelle oder in den Schatten, den ein in sie gestellter Schirm entwarf, brachten. In beiden Fällen beobachteten sie ein Steigen und Fallen der Thermometers an den Stellen, wo statt der Wärmestrahlen angewendete Lichtstrahlen helle und dunkle Streifen hervorgerufen hätten. Polarisation der Wärme wies Knoblauch nach, indem er zunächst die Wärmewirkung des von einem Heliostatenspiegel reflektierten Sonnenlichtes mit der Thermosäule untersuchte und dann nach Einschaltung eines Nicol'schen Prismas in dasselbe diese Untersuchung in den zwei Richtungen, in denen das Licht polarisiert wurde, wiederholte. In der Stellung des Nicols, in der der Spiegel hell erschien, war die Wärmewirkung viel größer als in den andern, und dieser Unterschied zeigte sich besonders stark, wenn der auf den Spiegel treffende Lichtstrahl mit dem Einfallslot den Polarisationswinkel von 35° einschloß. In ähnlicher Weise beobachtete Knoblauch auch Doppelbrechung der Wärme.

---

*) Hippolyte Louis F., geb. 1819 in Paris, lebt als Privatmann daselbst.

Eine solche vollkommene Übereinstimmung zwischen Licht und Wärme läßt nun von vornherein erwarten, daß wir auch Phosphorescenz- und Fluorescenzerscheinungen der letzteren werden beobachten können. Da aber, worauf wir bereits hindeuteten, beides Eigenschaften sind, die einem bestimmten Stoffe zukommen, also von den Molekülen desselben beeinflußt werden müssen, so wird zunächst zu untersuchen sein, ob die Moleküle gegen Wärme dasselbe Verhalten zeigen wie gegen Licht. Während Licht nur ein Körper aussenden kann, wenn er eine sehr hohe Temperatur besitzt, so strahlt er Wärme gegen jeden andern Körper aus, wenn dieser nur eine geringere Temperatur hat als er selbst. Dem Ausstrahlungsvermögen eines Körpers und der Abhängigkeit desselben von verschiedenen Umständen werden wir also zunächst unsere Aufmerksamkeit zuwenden müssen.

Dies geschieht am besten, wenn man den zu untersuchenden Körper in einer bestimmten Entfernung von der Thermosäule aufstellt und deren Erwärmung beobachtet. Um das Ausstrahlungsvermögen verschiedener Körper aber miteinander vergleichen zu können, muß man sicher sein, daß sie dieselbe Temperatur haben, und um das zu erreichen, überzieht man mit ihnen die Seiten eines Leslie'schen Würfels, der mit kochendem Wasser gefüllt ist, oder läßt, wenn man es mit Gasen zu thun hat, solche an der Wand des Würfels emporsteigen. Dabei verhalten sich die Körper nun sehr verschieden. Fein verteilte Kohle, mit der man den Würfel am besten überzieht, wenn man ihn berußt, strahlt alle ihr mitgeteilte Wärme wieder aus. Bei Metallen richtet sich dies nach der Beschaffenheit ihrer Oberfläche. Ist dieselbe rauh, so strahlen sie viel mehr Wärme aus, als wenn dieselbe poliert ist, ebenso giebt eine durch Hämmern dichter gewordene Oberfläche mehr Wärme ab als eine weniger dichte gegossene. Allgemein zeigen Körper von schwarzer Farbe ein stärkeres Ausstrahlungsvermögen als solche von weißer. Auch wird die Wärme keineswegs allein von der Oberfläche ausgestrahlt,

sondern es nehmen auch tiefere Schichten an der Ausstrahlung teil. Den Beweis dafür lieferte Melloni, indem er auf die eine Fläche des Leslie'schen Würfels mehrere Firnisschichten übereinander auftrug. Erst nachdem er 16 derselben aufgestrichen hatte, zeigte das Zufügen weiterer keinen Einfluß mehr auf die Ausstrahlung, bei Ruß dagegen mußte er 35 auftragen, um zu demselben Ziel zu gelangen.

Wenn nun das Kirchhoff'sche Gesetz auch für die Wärmestrahlen der Körper Giltigkeit hat, dann muß ein Körper, der Wärme stark ausstrahlt, dieselbe auch stark absorbieren und umgekehrt. Um dies zu untersuchen, hat man die eben beschriebenen Versuche nur zu wiederholen, allein mit dem Unterschiede, daß man nicht den Würfel, sondern die Thermosäule mit dem zu untersuchenden Körper überzieht oder auf irgend eine andere Art mit ihm in Berührung bringt. Das Ergebnis derartiger Versuche war, daß das Kirchhoff'sche Gesetz auch auf Wärmestrahlung ausgedehnt wurde. Aus ihm erklären sich uns leicht eine Anzahl oft zu beobachtender Erscheinungen. So zunächst der bekannte Versuch, daß von zwei im Sonnenschein auf Schnee gelegten Tuchläppchen, von denen das eine schwarz, das andere weiß ist, jenes viel rascher den Schnee unter sich wegschmilzt und infolge davon in ihn einsinkt, als dieses. Ebenso sinken dunkle Steine sehr rasch in Schnee oder Eis ein. Das geringe Ausstrahlungsvermögen von blanken Metalloberflächen macht man sich zu Nutze, indem man Gefäße, die ihre Wärme möglichst lange bewahren sollen, wie Wasserkessel, Thee- und Kaffeekannen, mit polierten Metall- oder Porzellanoberflächen versieht. So geben auch um ihrer weißen und glatten Oberfläche willen Porzellanöfen die Wärme nur langsam ab und sind deshalb besonders dazu geeignet, einen Raum längere Zeit hindurch behaglich warm zu erhalten, während eiserne Öfen, welche die ihnen mitgeteilte Wärme rasch ihrer Umgebung mitteilen sollen, mit Graphit (Kohlenstoff) bestrichen werden müssen. Auch spielt bei der Wahl unserer Kleidung das verschiedene Absorptions- und

Emissionsvermögen der Stoffe seine Rolle, wenn freilich in viel untergeordneterer Weise, als man dies hin und wieder darstellt. Reinlichkeits- oder Zweckmäßigkeitsrücksichten erweisen sich hier wohl als mächtiger, wie die Rücksichten auf jenes Vermögen. Die lebenden und toten Pflanzenteile nehmen wie ihr Hauptbestandteil, der Kohlenstoff, leicht die Wärme auf und geben sie ebenso leicht wieder ab. Deshalb schmelzen auf Eis gefallene Äste und Zweige an heiteren Wintertagen so leicht in dasselbe ein und frieren dann durch ihre Abkühlung während der folgenden Nacht zum großen Verdruß der Schlittschuhläufer daran fest. Aus demselben Grunde überziehen sich bei plötzlich warm und feucht werdender Witterung im Winter die Äste und Zweige mit einer Eiskruste oder bei dem umgekehrten Vorgange mit Rauhreif, während andere Körper davon frei bleiben.

Wird nun ein Körper auf irgend eine Weise über die Temperatur seiner Umgebung erwärmt, so strahlt er diese Wärme nach allen Richtungen wieder aus. Deshalb bewirkt ein Ofenschirm eine gleichmäßigere Verteilung der Wärme, als sie der Ofen selbst herbeizuführen imstande ist. Die Wärmestrahlen, die von dem Ofen ausgehen, dienen dann nur dazu, den Schirm zu erwärmen, und es liegt auf der Hand, daß er bei der geringen Durchlässigkeit des Glases für Wärme auch aus diesem Stoffe bestehen kann. Dabei ist es im allgemeinen einerlei, ob die vom Ofen ausgehenden Strahlen große oder gar keine Leuchtkraft besitzen. Insofern nun ein Körper die auf ihn treffenden Wärmestrahlen wieder weiter strahlt, zeigt er in allgemeinerer Weise diejenige Eigenschaft, die wir beim Lichte Phosphorescenz nannten, und insofern er dabei Lichtstrahlen in Wärmestrahlen verwandeln kann, besitzt er auch die Eigenschaft der Fluorescenz. Man sieht leicht, das Absorptions- und Emissionsvermögen eines Körpers ist die allgemeinere Eigenschaft, sie kommt in hohem Grade allen Körpern zu, die Phosphorescenz und Fluorescenz sind dagegen die spezielleren Fälle, die nur in merkbarer Weise bei Lichtstrahlen von verhältnis-

mäßig großer Intensität und bei ganz bestimmten Körpern auftreten.

Von besonderer Wichtigkeit wird die Fähigkeit der meisten Körper, leuchtende Strahlen als dunkle Wärmestrahlen wieder auszugeben, für den mit Ackerkrume bedeckten Erdboden. Denn indem dieselbe dunkle wie leuchtende Strahlen sehr stark absorbiert, so strahlt sie, dadurch erwärmt, nur dunkle Wärmestrahlen wieder aus und zwar ebensowohl gegen die sich in ihr befindlichen Pflanzenwurzeln, wie gegen die ihr benachbarten Luftschichten, beide in entsprechender Weise erwärmend. Dies ist namentlich wichtig, wenn die Sonnenstrahlen, die den Boden treffen, durch eine viel Wasser enthaltende Atmosphäre ihrer dunkeln Wärme beraubt sind; der Erdboden verwandelt alsdann die ihn allein treffenden leuchtenden Strahlen in dunkle Wärme und strahlt diese wieder gegen die Luft in seiner Umgebung aus. Dieselben Wasserteilchen, welche nun aber die Wärmestrahlen der Sonne verhinderten, bis zum Erdboden vorzudringen, halten diesen auch ab, sie wieder gegen den Weltenraum auszustrahlen. Diese Ausstrahlung wird aber nicht verhindert bei Gegenden, über denen immer trockene Luft sich befindet, wie über dem Inneren wasserarmer Kontinente oder über hohen Bergen. Hier strahlt der Erdboden alle ihm zugeführte Wärme wieder aus, und die Temperaturunterschiede, welche beschattete und besonnte Stellen zeigen, werden viel höher als bei feuchter Luft. Da nun weiter das Land sich rasch erwärmt und rasch abkühlt, während das Wasser beides nur langsam bewerkstelligt, so wird das kontinentale Klima durch warme Tage und kühle Nächte neben heißen Sommern und kalten Wintern charakterisiert, während die Unterschiede zwischen den Tages- und Jahreszeiten im oceanischen Klima viel geringer sind. Auch erklärt sich hieraus der an den Küsten während sonniger und sonst windstiller Tage über Tag landeinwärts wehende kühle Seewind, welchen abends der seewärts blasende Landwind ablöst, da bei Tage das Land, bei Nacht das Wasser wärmer ist.

Der raschen Abkühlung des Erdbodens während der Nacht infolge der Ausstrahlung gegen den Weltenraum verdankt endlich eine Erscheinung ihre Entstehung, welche auf der ganzen Erde vorkommt und für weite Landstrecken zu gewissen Zeiten von der höchsten Bedeutung werden kann, die Bildung des Taues und Reifes.

Namentlich durch die Bemühungen von Wells*) und Melloni ist der einigermaßen komplizierte Vorgang vollständig aufgeklärt. Zunächst zeigte Wells, indem er ein Thermometer auf Gras legte, ein anderes etwa 1,2 m darüber aufhing, daß das untere bis nahe 8° tiefer stand als das obere, daß aber dieser Unterschied sehr viel geringer wurde, wenn das im Grase liegende Thermometer und seine nächste Umgebung durch ein frei aufgestelltes Brettchen oder ein dachförmig gebogenes Stück Pappe vor der Ausstrahlung gegen den hellen Himmel geschützt war. Eine über ihm hinziehende Wolke ließ es ebenfalls sofort steigen. Melloni fand sodann, daß, wenn er zwei Thermometer neben einander auf die Erde legte, von welchen das eine in gewöhnlicher Weise mit einer Glaskugel, das andere mit einer versilberten Kugel versehen war, das letztere stets um 2° höher stand als das erstere. Da die versilberte Thermometerkugel gar keine Wärme ausstrahlt, also die Temperatur der umgebenden Luft angiebt, so war dieser Unterschied von 2° durch die Ausstrahlung des Glases des gewöhnlichen Thermometers bewirkt. Daraus schloß Melloni, daß das Ausstrahlungsvermögen eines Körpers stets bestrebt sein wird, diesen Unterschied mit der umgebenden Luft herzustellen. Hat sich also das Gras um 2° gegen die umgebende Luft abgekühlt, so nimmt diese durch Berührung mit ihm nach und nach dieselbe Temperatur an, das Gras strahlt dann aber wieder Wärme aus, um den Unterschied von 2° wieder herzustellen, die Lufttemperatur wird dadurch wieder erniedrigt, und so sinkt die Temperatur des Grases mehr

*) William Charles W., geb. 1757 in Charlestown (Südcarolina), war erst Chirurg in einem schottischen Regimente, seit 1785 Arzt in London, wo er 1817 starb.

und mehr bis zu einer Grenze, welche durch die wieder erfolgende Erwärmung nach Sonnenaufgang oder durch die erwärmende Wirkung des Erdbodens gesteckt ist und nach Pouillets *) Versuchen etwa 7° unter der jedesmaligen Lufttemperatur liegt. Soll aber diese niedrigste Temperatur erreicht werden, so ist ruhige Luft eine unerläßliche Bedingung, weil sonst die abgekühlte stets durch wärmere wieder verdrängt wird. Ist nun die Temperatur des Grases unter die der umgebenden Luft gesunken, so schlägt sich der in dieser enthaltene Wasserdampf, der auch in trockener Luft über einem pflanzenbedeckten Boden nie fehlt, als Wasser nieder. Der Tau entsteht also in den bei weitem meisten Fällen am Grashalme selbst, und fällt nicht aus der Luft hernieder. Daß er nun zuerst an den Pflanzen auftritt, hat seinen Grund in dem großen Absorptions- und Emissionsvermögen des Pflanzenkörpers. Wie wichtig für die Pflanzen dasselbe hinsichtlich der nötigen Wasserzufuhr namentlich in trockenen Zeiten sein muß, liegt auf der Hand; manche, wie Rüben mit ihren breiten, mitten vertieften Blättern, die den Tau der Wurzel zuleiten, bewirken so ein allnächtliches Begießen der Wurzel. Auch erklärt sich dadurch die bekannte Thatsache, daß an trocknen heitern Abenden nach Sonnenuntergang die Luft viel rascher über Parks, Wiesen ꝛc. kühl wird, als über den Straßen der Städte. Jedes Mittel, das vor Ausstrahlung schützt, wird also auch geeignet sein, die Pflanzen vor schädlichen Frostwirkungen zu bewahren, und so können ganz dünne Strohdecken, der Rauch eines in der Nähe angezündeten Feuers ꝛc. Pflanzen gegen das Erfrieren schützen. Umgekehrt gewährt in Gegenden mit lange Zeit hindurch heiterem Himmel die allnächtlich erfolgende kräftige Ausstrahlung die Möglichkeit, künstliches Eis dadurch zu bereiten, daß man Wasser in flachen Gefäßen der Ausstrahlung gegen den Himmel aussetzt, zugleich aber durch untergelegtes Stroh

*) Claude Servais Mathias P., geb. 1790 in Cusance (Doubs) war Prof. seit 1831—1849 Director des Conservatoire des Arts-et-Metiers in Paris, wo er 1868 starb.

verhindert, daß Wärme von dem Erdboden zu dem Wasser gelangen kann.

Wärmeleitung und spezifische Wärme, Schmelz- und Verdampfungswärme.

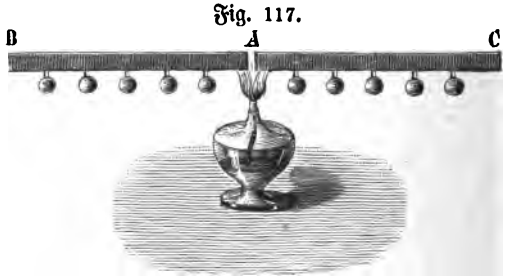
Wenn wir im vorigen Abschnitte zu dem Ergebnisse gelangten, daß die Wärme wie das Licht durch Schwingungen des Lichtäthers entsteht, daß alle Lichtstrahlen auch Wärmewirkungen hervorrufen können, daß aber Strahlen von sehr großer Wellenlänge nur Wärmewirkungen, nie aber Lichtempfindung zu verursachen imstande sind, so dürfen wir noch nicht den Schluß ziehen, daß Wärme nichts anderes sei, als Licht. Denn es giebt eine Anzahl Erscheinungen, die wohl die Wärme, die aber nie das Licht zeigt und auf welche wir nunmehr zunächst unsere Aufmerksamkeit zu richten haben.

Bringt man einen Metallstab mit dem einen Ende in ein Herd- oder Ofenfeuer, während man das andere in der Hand hält, so bemerkt man, daß auch dieses bald viel zu heiß wird, als daß man es, ohne sich zu verbrennen, noch in der Hand behalten könnte. Dabei ist es ganz gleichgiltig, ob man das nicht im Feuer befindliche Ende durch Schirme auf das sorgfältigste vor Bestrahlung schützt oder nicht. Die Wärme muß demnach den Stab durchdringen, der Stab die Wärme leiten, wie man sich ausdrückt. Die Fähigkeit, die Wärme zu leiten, besitzen aber verschiedene Körper in sehr verschiedenem Grade, ja es ist möglich, daß sie einzelnen Körpern gänzlich fehlt. Denn ersetzt man den metallenen Stab durch einen hölzernen und zündet diesen an dem einen Ende an, wodurch dasselbe auf eine sehr hohe Temperatur gebracht wird, so kann man das andere Ende in der Hand halten, ohne sich zu verbrennen. Man teilt deshalb die Körper ein in schechte und gute Wärmeleiter.

Zu den letzteren gehören die Metalle. Doch ist auch ihre Leitungsfähigkeit verschieden, wie folgender von Tyndall angegebener Versuch beweist. Stellt man zwei Stäbe, von denen

der eine aus Kupfer, der andere aus Eisen besteht, horizontal so auf, daß zwei ihrer Enden bei A, Fig. 117, ganz nahe vor einander stehen, und stellt dann unter A eine brennende Lampe, so wird die Wärme sowohl von A nach B, als auch nach C geleitet, aber mit verschiedener Geschwindigkeit. Denn wenn man an die untere Seite der Stäbe eine Anzahl hölzerner Kugeln in gleichen Abständen von einander mit Wachs anklebt, so fallen sie infolge der Wärmeleitung des Stabes nacheinander ab, je nachdem das Wachs schmilzt und zwar desto früher, je näher sie an A sich befinden. Da aber die an dem Kupferstab hängenden Kugeln eher herabfallen als die in gleiche Entfernungen an den Eisenstab angeklebten, so muß die Wärme das Kupfer rascher durchdringen, dieses der bessere Leiter sein als das Eisen.

Fig. 117.



In welcher Art nun die Wärmebewegung in Metallstäben vor sich geht, beweist am besten der folgende von Despretz*) auf Fouriers**) Vorschlag angestellte Versuch. In einen eisernen Stab, dessen eines Ende in eine Wand so eingemauert war, daß er auf der andern Seite derselben noch ein wenig hervorstand, waren in gleichen Abständen Löcher gebohrt, welche Queckſilber

*) Cäsar Mansuète D., geb. 1792 zu Lessines in Belgien, war Prof. in Paris, wo er 1863 starb.

**) Jean Baptiste Joseph F., geb. 1768 zu Auxerre, wurde 1796 Prof. in Paris, machte den Feldzug nach Egypten mit, wurde 1802 Präfekt des Isere-Departements, lebte dann seit 1815 als Privatmann in Paris, wo er 1830 starb.

zur Aufnahme der Gefäße seiner Thermometer enthielten. Wurde das jenseits der Wand befindliche Ende des Stabes erwärmt, so stiegen die ihm zunächst gelegenen Thermometer, und nahmen nach einiger Zeit einen unveränderlichen Stand ein, wobei natürlich das der Wand am nächsten gelegene den höchsten Stand zeigte. Die Beobachtung dieser Thermometer ergab nun, daß die Temperaturerhöhung des Stabes nur bis zu einer gewissen Entfernung von der Wärmequelle reichte, daß diese Entfernung aber sich änderte, wenn man einen Stab aus anderem Metalle wie Eisen nahm. Sie war um so größer, je besser der Stab die Wärme leitete, je rascher sie also sich durch ihn hindurch bewegte. Die Erklärung dieses Versuches ergiebt sich leicht. Da die Stäbe Wärme gegen die Umgebung ausstrahlten, sobald sie wärmer geworden waren als diese, so konnte nicht alle Wärme, welche einen beliebigen Querschnitt des Stabes passierte, in den benachbarten Querschnitt übergehen, vielmehr ging ein Teil durch Strahlung verloren. Da die Oberflächen der Stäbe gleich gut bearbeitet waren, so hing dieser Verlust lediglich von der Zeit ab, die die Wärme brauchte, um einen Querschnitt zu durchschreiten. Wie nun Wasser, welches eine nicht dichthaltende Röhre durchströmt, weiter gelangt, wenn in gleichen Zeiten größere Mengen einen beliebigen Querschnitt durchströmen, als wenn diese Mengen viel kleiner sind, oder, was dasselbe ist, wenn seine Geschwindigkeit größer ist, so auch bei der die Stäbe durcheilenden Wärme. Der Punkt, wo Wärmeabgabe an die Umgebung und Wärmezufuhr durch den Stab gleich groß sind, wo also ein dort aufgestelltes Thermometer keinen erhöhten Stand mehr zeigen wird, muß bei einem besseren Wärmeleiter von der Wärmequelle entfernter liegen als bei einem schlechteren, und so kann dieser Versuch dazu dienen, das Wärmeleitungsvermögen zweier Körper zu bestimmen. Zum Unterschied von derjenigen Wärmemenge, welche der Körper in der Zeiteinheit durch Strahlung abgiebt, dem äußeren Leitungsvermögen für Wärme, nennt man diejenige Wärmemenge, welche die Einheit des Quer-

schnittes eines Körpers in der Zeiteinheit durcheilt, wenn zwei um die Längeneinheit entfernte Querschnitte einen Temperaturunterschied von 1° C zeigen, inneres Leitungsvermögen, und wenn man nach diesem die folgenden Körper so ordnet, daß immer der bessere Leiter voransteht, so erhält man die folgende Reihe: Silber, Kupfer, Gold, Messing, Zinn, Eisen, Platin, Wismut, Marmor, Porzellan, Ziegel. Übrigens leiten nicht alle Körper die Wärme nach allen Richtungen gleich gut, so einige Krystalle oder auch Holz, welches letztere sie nach der Richtung der Fasern rascher durcheilt, als senkrecht darauf. Diese Eigenschaft des Stoffes, aus denen ihr Stamm besteht, gewährt den Bäumen den Vorteil, daß verhältnismäßig leicht die Wärme aus dem Erdboden in den Stamm und die Äste gelangen kann, während dieselben gleichzeitig durch die sehr schlecht leitende Rinde gegen Wärmeabgabe an die Luft vortrefflich geschützt sind. Merkwürdig ist, daß mit Ausnahme derjenigen des Eisens die Leitungsfähigkeit der Metalle für Wärme gut übereinstimmt mit der für Elektrizität.

Für die Verhältnisse des gewöhnlichen Lebens und die Anwendungen in der Technik ist nun aber die Kenntnis der Wärmeleitungsfähigkeit solcher Körper, welche in Pulverform oder Faserform vorkommen, von besonderer Bedeutung. Sie ist von Rumford*) in der Weise untersucht, daß derselbe solche Körper in eine Glaskugel füllte, in deren Mitte das Gefäß eines Thermometers angebracht war, und die Kugel dann gut verstopfte. Sie wurde nun erst durch Einsenken in siedendes Wasser auf die Temperatur desselben gebracht, darauf in Eis gestellt und die Zeit beobachtet, die verfloß, bis das Thermometer auf 20° gesunken war. Auf große Genauigkeit können diese Versuche natürlich keinen Anspruch

*) Sir Benjamin Thompson, Graf v. R, geb. 1753 in Rumford (Nordamerika), war erst Schullehrer, trat dann in dem amerikanischen Freiheitskriege in die Miliz, siedelte 1783 nach England, 1785 nach München über, wo er Generallieutenant wurde. Nach abermaligem kurzen Aufenthalt in England begab er sich nach Paris und starb 1814 in Auteuil bei Paris.

machen, aber sie genügen, diese Körper nach ihrer Leitungsfähigkeit zu gruppieren. Es ergab sich zunächst aus ihnen, daß alle Körper im pulverisierten Zustande die Wärme viel schlechter leiten, als wenn man sie in Stabform herstellt, sodann aber, daß sich nach ihrer Leitungsfähigkeit die die Wärme schlecht leitenden Körper in die nachstehende Reihe ordnen ließen, in welcher der beste Leiter immer vorangeht: Gedrehte Seide, Holzasche, Kohle, Flachs, Baumwolle, Lampenruß, Schafwolle, rohe Seide, Eiderdunen, Hasenhaar.

Diese Zusammenstellung zeigt, daß die Stoffe, deren wir uns zumeist zur Kleidung bedienen, schlechte Leiter sind. Mit dem beinahe schlechtesten suchen wir unsere Körperwärme nachts zusammenzuhalten, wo die verlangsamte Atmung mit geringerer Energie wie im wachen Zustande für die Erhaltung unserer Körpertemperatur sorgt. Umgekehrt kann man mittelst dieser Stoffe auch die Kälte bewahren, d. h. Wärmezufuhr von außen von einem kalten Körper abhalten. Man wickelt zu diesem Zwecke Eis, welches vor dem Schmelzen geschützt werden soll, in wollene Decken. In größeren Mengen bewahrt man es in den Eiskellern, in Räumen, die gegen Wärmezuleitung aus der Luft und dem Erdboden durch eine dicke Lage von Asche oder Stroh geschützt werden. In Schiffen transportiert man es in ähnlicher Weise, indem man es in Behälter einpackt, welche von Sägespänen umgeben sind. Doch muß man in allen diesen Fällen verhindern, daß nicht die äußere Luft in den Eiskeller dringt, indem man eine doppelte Thür anbringt und die innere nie öffnet, ehe die äußere wieder geschlossen ist. In früheren Zeiten, als man anstatt der explodierenden Geschosse der Neuzeit glühende Kugeln in die belagerten Städte schleuderte, schützte man das in den Mörser gebrachte Pulver vor vorzeitiger Entzündung, indem man es mit einer genügend dicken Lage von Asche oder Gipsmehl bedeckte, auf welche man die glühende Kugel brachte.

Schlechte und gute Wärmeleiter unterscheiden wir sofort durch unser Gefühl; diese entziehen uns Wärme, wenn wir sie

berühren, sie fühlen sich deshalb kalt an, jene thun dies nicht, sie stellen sich uns als warm dar. Sorgt man für rasche und genügende Fortleitung der Wärme eines Körpers dadurch, daß man ihn mit guten Leitern in innige Berührung bringt, so wird ein solcher Körper überraschend schnell abgekühlt. Darauf beruht die Wirkung eines über eine Flamme gehaltenen Drahtnetzes. Eine Flamme ist glühendes Gas. Hält man also ein Drahtnetz über eine Flamme, so kühlt das Netz die durch seine Maschen hindurchströmenden Gase so kräftig ab, daß sie zu glühen aufhören. Es erhält dann den Anschein, als drücke man mit dem Netze die Flamme herab. Um zu verhindern, daß die Flamme an die Glaswand eines Kochkolbens schlage und dadurch denselben gefährde, läßt man deshalb die Flamme unter einem Drahtnetz brennen, auf welchem der Kolben steht. Umgekehrt kann man die Flamme auch nur oberhalb des Drahtnetzes brennen lassen, wenn man über einen geöffneten Gashahn das Drahtnetz hält und über diesem das Gas entzündet. Ist das Netz dicht und groß genug, so schlägt die Flamme nicht bis zum Brenner herab und man kann sie erlöschen machen, wenn man das Netz vorsichtig hebt. Ein solches Drahtnetz, als Respirator vor den Mund gehalten, erwärmt sich beim Ausatmen rasch, giebt aber ebenso rasch seine Wärme wieder an die kalte Luft ab, die beim Einatmen eintritt. Wie ein Respirator wirken übrigens auch die Kanäle der Nase und es ist deshalb ein solcher Apparat einem jeden entbehrlich, der sich angewöhnt hat durch die Nase zu atmen, eine Angewohnheit, die auch aus andern Gründen der Gesundheit sehr zuträglich ist.

Dieselbe Eigenschaft der Drahtnetze hat man zur Herstellung der Sicherheitslampen für Bergleute und der sogenannten Regeneratoren benutzt. Die ersteren haben die Bestimmung, die entsetzlichen Katastrophen, welche die Entzündung schlagender Wetter in Bergwerken nach sich zieht, zu verhüten. Die Anregung zu ihrer Konstruktion gab ein fürchterliches Unglück, welches eine solche Explosion in den Gruben von Newcastle angerichtet hatte.

Von ganz verschiedenen Gesichtspunkten ausgehend, kamen damals George Stephenson*) und Davy**) auf denselben Apparat, der in nichts weiter besteht, als einer Umhüllung von Drahtnetz, innerhalb welcher die Flamme der Lampe brennt. Stephenson, der als Freiwilliger nach dem Einstürzen des Schachtes in denselben hinuntergestiegen war, um zu sehen, ob den Verunglückten noch Hilfe zu bringen sei, ging von der Beobachtung aus, daß die Herdflamme nie durch ein kleines Loch schlägt, welches sich in der Herdplatte befindet; Davy dagegen, aufgefordert von den Bergwerksbesitzern in Newcastle, kam auf die Empfehlung jenes Schutzmittels, indem er seine so berühmt gewordene Untersuchung des Wesens der Flamme zu Grunde legte. Der Schutz, den der Apparat gewährt, besteht darin, daß kleine Explosionen, die aber nur innerhalb des Drahtgeflechtes stattfinden, den Bergmann von dem Vorhandensein eines gefährlichen Gasgemenges in Kenntnis setzen und es ihm so ermöglichen, aus dem Raume, der es enthält, zu entfliehen, ehe die fortgesetzten Gasentzündungen das Drahtgeflecht soweit erhitzen, daß eine Entflammung der Wetter stattfinden kann.

Der Regenerator ist nichts anderes als ein Respirator im Großen. Er wurde 1856 von Ericsson***) seiner Heißluftmaschine zugefügt, um die der Luft im Apparate mitgeteilte Wärme beim Entweichen derselben zurückzuhalten. Dazu strömt sie durch eine Anzahl über einander gelegter Drahtnetze, welche sie erhitzt, indem sie sich selbst abkühlt. An die dann beim Spiel der Maschine in rascher Folge einströmende kalte Luft geben die Netze die zurückbehaltene Wärme wieder ab. Die neuerdings von A. W. Siemens in London erfundenen und von

*) George St., geb. 1781 in Wylam, war erst Heizer, später Ingenieur und Besitzer einer Lokomotivbauanstalt in Newcastle. Er starb 1848 bei Chesterfield.

**) Sir Humphrey D., geb. 1778 in Penzance, Cornwallis, war erst Apotheker, seit 1802 Prof. in London. Er starb 1829 in Genf.

***) John E., geb. 1803 in Wermland in Schweden, diente im Ingenieurkorps der schwedischen Armee, ging dann nach England, von da nach Amerika. Er starb 1869 in New-York.

Fr. Siemens*) für Luftheizungen, Leichenverbrennungsöfen, Glasöfen ꝛc. angewendeten Regeneratoren beruhen auf Wärmestrahlung und Wärmeabgabe durch Berührung, nicht auf Wärmeleitung. Sie bestehen aus einem System von Kanälen, welche aus feuerfesten Steinen aufgemauert werden. Durch diese Kanäle werden die Verbrennungsgase getrieben und erhitzen dabei die Wände derselben auf das höchste. Indem man darauf durch dieselben Kanäle die Luft von außen eintreten läßt, erhitzt sich dieselbe an den glühenden Steinen der Wände und kommt so in den Verbrennungs- oder den zu heizenden Raum. Man bedarf zu jeder Heizung ꝛc. zweier solcher Kanal-Systeme, durch deren eines die Verbrennungsgase streichen, während durch das andere die Luft strömt. Ist jenes erhitzt, dieses abgekühlt, so wird durch Verstellung einer Klappe der Vorgang umgekehrt.

Es ist nun weiter zu untersuchen, ob die Flüssigkeiten und Gase auch die Fähigkeit haben, die Wärme zu leiten. Betrachten wir zunächst das Wasser, so scheint dasselbe Leiter und Nichtleiter zugleich zu sein. Denn wenn man ein mit Wasser gefülltes Reagenzrohr von unten über einer Flamme erhitzt, während man es oben mit den Fingern hält, so wird es bald so heiß, daß man die Finger entfernen muß, wenn man sich nicht verbrennen will, während es unten kühl bleibt, wenn man es oben erhitzt. Der darin enthaltene Widerspruch löst sich aber leicht durch folgenden Versuch. Man werfe in ein Kochkölbchen, welches mit Wasser gefüllt ist, kleine Stückchen Filtrierpapier, die man vorher, zwischen den Fingern hin und her rollend, möglichst stark zusammengepreßt hat. Sie gehen nunmehr im Wasser unter, beschreiben aber, wenn dies durch eine untergestellte Lampe erhitzt wird, kreisförmige Bahnen, indem sie in der Mitte empor- und an den Wänden wieder herabsteigen. Sie deuten dadurch Strömungen an, die im Wasser infolge des Erhitzens entstehen. Das wärmere Wasser, als das leichtere, steigt in der Mitte empor,

*) Friedrich S., geb. 1826 in Menzendorff, ist Fabrikbesitzer in Dresden.

das kältere, als das schwerere, dagegen an den Wänden herab. Das emporsteigende warme Wasser, nicht Leitung der Wärme muß also in dem ersten Versuche mit dem Reagenzrohr die Wärme nach oben geführt haben. Soll demnach die Leitung einer Flüssigkeit untersucht werden, so muß man diese von oben erwärmen und die Erwärmung der unteren Teile untersuchen. Bei solcher Art zu experimentieren hat man gefunden, daß die Flüssigkeiten die Wärme leiten, wenn auch lange nicht so gut wie die Metalle; das Leitungsvermögen des Wassers z. B. ist nur ein hundertstel von dem des Kupfers. Quecksilber gehört in Bezug auf seine Leitungsfähigkeit natürlich zu den Metallen.

Die Untersuchung des Wärmeleitungsvermögens der Gase stößt auf dieselbe Schwierigkeit, der wir bei den Flüssigkeiten begegneten. Auch bei ihnen entstehen Strömungen der erwärmten Gasteilchen nach oben. Deshalb kühlt sich ein erhitzter in Luft aufgestellter Körper in dieser viel rascher ab als im luftleeren Raume, weil die von ihm erwärmten aufsteigenden Luftteilchen seine Wärme entführen, während sie immer wieder von unten oder den Seiten her durch kalte Luft ersetzt werden. Wo diese Strömungen vermieden wurden, hat sich die Leitungsfähigkeit der Gase als sehr gering ergeben. Mit Ausnahme des Wasserstoffs leiten sie die Wärme 20 000 mal schlechter als Kupfer. Das Leitungsvermögen des Wasserstoffs dagegen ist siebenmal größer als das der anderen Gase. Auf der geringen Leitungsfähigkeit der Luft beruht die oben erwähnte Thatsache, daß Körper in Pulverform die Wärme schlechter leiten als stabförmige Körper, weil das Pulver eine Mischung von Luft mit der Substanz darstellt. Auch erklärt sich daraus die hier und da vorkommende Anwendung von Luftschichten, mit denen man einen Körper umgiebt, um ihn vor Abkühlung zu schützen.

Erschien nun die Leitungsfähigkeit der Wärme als eine Eigenschaft, die recht wohl einer Flüssigkeit, aber nicht einer Wellenbewegung zukommen kann, so scheinen eine Anzahl weiterer

Erscheinungen noch entschiedener mit der Annahme einer solchen Bewegung im Widerspruch zu stehen. Man kann in einen Körper Wärme sozusagen einfüllen, daß sie unserer Wahrnehmung entschwindet, und sie dann wieder herausnehmen, genau wie Wasser, welches in ein geschlossenes Gefäß gebracht wird. Um dies zu zeigen, bringe man in einem Gefäß von dünnem Glas, welches mit gestoßenem Eis gefüllt ist, ein Thermometer so an, daß sich dessen Kugel etwa in der Mitte des Gefäßes befindet; kühlt man dann dasselbe in einem kalten Raume soweit wie möglich unter den Schmelzpunkt des Eises ab und bringt es nun in ein mäßig warmes Zimmer, so sieht man das Thermometer nach und nach steigen. Das Eis wird also langsam erwärmt. Endlich beginnt dasselbe zu schmelzen, sofort aber hört das Steigen des Thermometers auf; die Temperatur bleibt also nunmehr konstant. Hieran ändert sich nichts, wenn man auch durch Untersetzen einer Lampe die Wärmezufuhr beschleunigt. Die Wärme kann also nunmehr nur die Wirkung haben, das Eis in Wasser zu verwandeln. Fährt man dann mit der Erwärmung fort, so beginnt die Temperatur des Wassers wieder zu steigen, sobald alles Eis geschmolzen ist. Sie wird aber wieder konstant, sobald das Wasser kocht, sie muß jetzt mithin dazu verwandt werden, Wasser in Wasserdampf zu verwandeln. Würde man den Dampf auffangen und weiter erhitzen, so würde seine Temperatur wieder zunehmen.

Ebenso verhalten sich andere Körper, nur daß sie bei anderen Temperaturen schmelzen oder sieden. So schmilzt weißes Wachs bei 68°, Quecksilber bei — 39°, Schwefel bei 115°, Zinn bei 235°, Zink bei 423°, Kupfer bei 1090°, Schmiedeeisen aber erst bei 1600°. Dagegen siedet bei einem Barometerstand von 760 mm Schwefeläther bei 34°,9, Alkohol bei 78°,4, Schwefel bei 447°,5, Quecksilber bei 350° u. s. w. Der konstante Wert der Schmelz- und Siedetemperatur, welche man, wie wir sahen, bei der Anfertigung der Thermometer mit Vorteil benutzt, beweist somit, daß Wärme einem Körper zugeführt werden kann, ohne daß der-

Hermann Helmholtz.

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA.

selbe erwärmt wird. Wirkungslos freilich bleibt diese Wärme nicht, sie verwandelt vielmehr den Aggregatzustand, aber man möchte auf die Vermutung kommen, daß dies in derselben Weise geschieht, wie Wasser, welches man Eisen zuführt, dieses in Rost verwandelt. Dieselben Wirkungen, wie sie die Wärme auf Wasser ausübt, kann man auch bei andern Körpern beobachten. Die einem Körper zugeführte Wärme kann also zur Temperaturerhöhung, zur Verflüssigung oder zum Verdampfen verwendet werden und es wird sich nun weiter fragen, ob eine bestimmte Wärmemenge, also eine bestimmte Anzahl Kalorien nötig ist, um die Temperatur einer gegebenen Menge eines Körpers zu erhöhen, um sie zu schmelzen oder zu verdampfen, oder ob hierbei feste Zahlenverhältnisse nicht stattfinden.

Wir beginnen mit der Untersuchung der Wärmemenge, welche die Temperatur eines Körpers um eine gegebene Anzahl Grade erhöht.

Zu dem Ende erwärmen wir 1 kg Eisen in einem Luftbade bis zu 50° und lassen es dann plötzlich in ein Gefäß fallen, welches 1 kg Wasser von 0° enthält. Ein in demselben befindliches Thermometer zeigt dann an, daß die Temperatur des Wassers steigt; durch Umrühren sorgt man dafür, daß dies möglichst rasch geschieht, und bald bleibt dann das Thermometer auf 5° stehen. Da jetzt Eisen und Wasser dieselbe Temperatur haben, so hat sich das Eisen um 45° abgekühlt. Die dabei abgegebene Wärme hat dazu gedient, um die Temperatur von 1 kg Wasser um 5° zu erhöhen, es müssen also 5 Kalorien gewesen sein. Bringt man umgekehrt 1 kg Eisen von 0° in 1 kg Wasser von 50°, so erhält unter Beobachtung der nämlichen Vorsichtsmaßregeln die Mischung eine Temperatur von 45°. Es sind also auch 5 Kalorien nötig gewesen, um 1 kg Eisen um 45° zu erwärmen. Anstatt Eisen und Wasser hätten wir nun auch beliebige andere Körper nehmen können und wir finden somit das Gesetz, daß dieselbe Wärmemenge nötig ist, um die Temperatur eines Körpers um eine bestimmte Anzahl

Grade zu erhöhen, die er abgiebt, wenn seine Temperatur um dieselbe Anzahl Grade sinkt. Es hat sich nun ergeben, daß innerhalb der Temperaturgrenzen von 0° und 100° die Erhöhung der Temperatur um 1° immer sehr nahe die nämliche Anzahl Kalorien erfordert. Um also 1 kg Eisen um 1° zu erwärmen, bedarf man den 45. Teil von 5 Kalorien, d. i. 0,11 Kalorie. Für andere Körper würde man andere Zahlen erhalten haben. Die Wärmemenge, die nötig ist, um 1 kg eines Körpers um 1° zu erwärmen, heißt seine Wärmekapacität oder specifische Wärme. Da wir unter Kalorie diejenige Wärmemenge verstehen, welche die Temperatur von 1 kg Wasser von 0° auf 1° erhöht, so ist die Wärmekapacität des Wassers 1. Sie ist größer als die aller anderen Körper mit alleiniger Ausnahme des Wasserstoffs und deshalb begehen wir gerade bei Wasser den verhältnismäßig größten Fehler, wenn wir sie zwischen 0° und 100° konstant annehmen. Mit steigender Temperatur nimmt sie vielmehr ein wenig ab. Gießt man also ½ kg Wasser von 100° und ½ kg Wasser von 0° zusammen, so erhält man 1 kg Wasser, dessen Temperatur ein wenig niedriger ist als 50° und der Vorschlag Richmanns*), auf die angegebene Weise den Skalenpunkt 50 des Thermometers zu finden, kann nicht auf genaue Resultate führen.

Verschiedene Körper haben ganz verschiedene Wärmekapacitäten, welche nur auf experimentellem Wege gefunden werden können. So hat sich z. B. die des Wismuts zu 0,0308, die von Blei zu 0,0314, von Silber zu 0,0570, von Zinn zu 0,0562, von Kupfer zu 0,0952, von Eisen zu 0,1138, von frisch geschmolzenem Schwefel zu 0,1844 Kalorieen ergeben u. s. w. Aus dieser Verschiedenheit erklären sich zwei Versuche, welche Tyndall bei seinen berühmten Vorlesungen in der Royal Institution in London anstellte. Er

*) Georg Wilh. R., geb. 1711 in Pernau in Livland, war Mitglied der Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg, wo er 1753 in seinem Laboratorium vom Blitze erschlagen wurde, als er sich einem unterbrochenen Blitzableiter zu sehr genähert hatte.

nahm zwei ganz gleiche Prismen, das eine aus Eisen, das andere aus Wismut, bekleidete zwei ihrer kleinsten Flächen mit Wachs und stellte sie, diese Flächen nach oben gekehrt, auf den Deckel eines mit kochendem Wasser gefüllten Gefäßes. Obwohl nun das Eisen der bessere Leiter ist, schmolz das Wachs doch viel eher auf dem Wismutprisma. Die Wärmekapacität des Wismuts ist nämlich noch nicht $\frac{1}{3}$ von der des Eisens. Um die Schmelztemperatur des Wachses anzunehmen, bedurfte also das Eisen mehr als dreimal soviel Wärme als Wismut, und hierzu natürlich trotz seines besseren Leitungsvermögens mehr Zeit als dieses. Dafür würde sich aber die Wärme in ihm weiter fortbewegt haben als im Wismut. Sodann stellte Tyndall eine Wachstafel von etwa 1 cm Dicke so auf, daß unter ihrem mittleren Teil ein freier Raum blieb, und legte nun auf diesen gleich große Kugeln von Eisen, Kupfer, Zinn, Blei und Wismut, die sämtlich auf 180° im Ölbade erhitzt waren. Die Kugeln von Eisen und Kupfer schmolzen rasch durch und fielen herab, die Zinnkugel schmolz ein, blieb aber stecken, die Kugeln von Blei und Wismut aber brachten nur eine Vertiefung in der Wachstafel zu Wege. Die Wärmekapacitäten des Eisens und Kupfers sind nämlich größer als die der anderen, die aus ihnen bestehenden Kugeln hatten also mehr Wärme aufgenommen als die anderen, konnten also auch mehr abgeben und somit mehr Wachs schmelzen.

Da nun aber von allen Kugeln dieselbe Menge Wachs zu schmelzen war, wenn sie herabfallen sollten, so scheint es, als ob dazu auch eine ganz bestimmte Wärmemenge notwendig sei. Dann aber werden wir annehmen müssen, daß dasselbe auch für alle anderen Körper gilt, und somit würde die zweite der oben angeregten Fragen dahin zu beantworten sein, daß immer dieselbe Wärmemenge nötig ist, um 1 kg eines Körpers von der Schmelztemperatur aus dem festen in den flüssigen Zustand überzuführen. Die dazu erforderliche Wärmemenge heißt Schmelzwärme oder latente Schmelzwärme des Körpers. Das Experiment hat in der That

das nämliche Resultat ergeben. Um die Schmelzwärme eines Körpers zu bestimmen, geht man davon aus, daß er beim Erstarren dieselbe Wärmemenge wieder abgiebt, die er beim Schmelzen aufgenommen hat, eine Annahme, deren experimentelle Begründung wir uns vorbehalten. Man schmilzt nun eine abgewogene Menge des Körpers in einem Glasröhrchen, bestimmt seine Temperatur, bringt dann das Röhrchen in Wasser von bekannter Temperatur, läßt, während man das Wasser fortwährend umrührt, den Körper erstarren und sieht nunmehr, nachdem dies geschehen ist, zu, welche gemeinschaftliche Temperatur das Wasser und der Körper besitzen. Kennt man dann die specifische Wärme des Körpers im festen und flüssigen Zustande, so ist es leicht, die Wärmemengen zu bestimmen, welche der Körper an das Wasser abgab, als er sich bis zum Schmelzpunkte und weiter von der Schmelztemperatur bis zur Endtemperatur des Versuches abkühlte. Andererseits erfährt man aus der Erhöhung der Temperatur des Wassers die ganze von diesem aufgenommene Wärmemenge, die sich als größer ergiebt, als die durch die Abkühlung des Körpers ihm mitgeteilte, den Überschuß hat der Körper beim Erstarren abgegeben, es ist die Schmelzwärme. Auf diese Art hat man die Schmelzwärme des Wassers zu 80,00, die des Schwefels zu 9,368, des Zinnes zu 14,251, des Silbers zu 21,07, des Queckſilbers zu 2,83 bestimmt. Auch bezüglich der Schmelzwärme nimmt das Wasser insofern eine Ausnahmestellung ein, als um 1 kg Eis von 0^0 in Wasser von 0^0 zu verwandeln eine größere Wärmemenge nötig ist, als zum Schmelzen von 1 kg irgend eines anderen Körpers. Auf der verhältnismäßig beträchtlichen Wärmemenge, die demnach frei wird, wenn Wasser friert, beruht das Mittel, Äpfel, Kartoffeln, überhaupt Vegetabilien, deren Säfte bei einer Temperatur erstarren, die einige Grade unter der Gefriertemperatur des Wassers liegen, im Keller dadurch vor dem Erfrieren zu schützen, daß man einen großen Napf mit Wasser neben sie stellt. Sinkt die Temperatur im Keller nun auch einige Grade unter Null, so giebt das zuerst

erstarrende Wasser soviel Wärme aus, daß der Gefrierpunkt jener Pflanzensäfte nicht erreicht wird. Selbstverständlich gewährt dies Mittel keinen Schutz, wenn die Temperatur zu niedrig wird.

Ganz ähnliche Vorgänge wie beim Schmelzen finden nun beim Verdampfen statt und man nennt analog wie oben Verdampfungswärme oder latente Verdampfungswärme die Anzahl Kalorien, deren man bedarf um 1 kg einer Flüssigkeit von der Siedetemperatur in 1 kg Dampf von derselben Temperatur zu verwandeln. Diese Wärmemenge giebt dann 1 kg Dampf beim Niederschlag wieder aus. Doch ist dieselbe, worauf wir zurückkommen werden, abhängig vom Druck, ebenso wie die Siedetemperatur auch. Bei einem Drucke von 76 cm z. B. ist die Verdampfungswärme des Wassers 540 Kal., die des Alkohols 210 Kal., des Äthers 90 Kal. ꝛc.

Irdische Quellen der Wärme.

Außer dem Lichte und der Wärme der Sonne haben wir bisher als Licht- und Wärmequelle auch vielfach den stattfindenden Verbrennungsprozeß der Flamme einer Lampe oder denjenigen eines Kohlenfeuers benutzt. Wenn wir dabei auch die wichtigste unter den irdischen Wärmequellen kennen gelernt haben, so ist sie doch keineswegs die einzige. Es giebt vielmehr noch eine ganze Anzahl andere Vorgänge, bei denen Wärme entsteht, und gerade diese Entstehungsarten der Wärme sind für uns von der höchsten Bedeutung, einmal indem sie besonders geeignet sind, uns auf richtige Anschauungen über das Wesen der Wärme zu führen, dann aber auch, weil sie uns nötigen, sie nach Kräften zu vermeiden, um den äußerst schädlichen Wirkungen, die sie im Gefolge haben, vorzubeugen. Bei den mannigfachsten mechanischen Vorgängen treten derartige Wärmewirkungen auf, wovon wir uns nun des näheren überzeugen müssen.

Es ist ein bekanntes Kunststück der Nagelschmiede, einen Nagel durch geschicktes Hämmern stark zu erhitzen, ja zum Glühen zu

bringen. Eine gegen eine Mauer geschossene Büchsenkugel fällt herab, abgeplattet, aber mit deutlichen Spuren von Schmelzung ihres Metalles. In beiden Fällen stößt ein bewegter Körper gegen einen ruhenden und wird dadurch zu plötzlichem Stillstande gezwungen. In dem Stoß werden wir also die Ursache der Erwärmung sehen müssen, und daß durch ihn in der That Wärme entwickelt wird, hat Hirn*) durch besondere Versuche festgestellt, indem er einen pendelartig aufgehängten mächtigen Eisenblock aus seiner Gleichgewichtslage hob und gegen einen sehr solid befestigten Steinblock stoßen ließ. Zwischen beide wurde ein Stück Blei gehalten, in welches eine Vertiefung hereingearbeitet war, und dessen Temperaturerhöhung durch den Stoß genau bestimmt, indem man in die Höhlung Wasser goß und in dieses das Gefäß eines Thermometers brachte.

Da aber hierbei das Blei immer zusammengepreßt wird, so könnte man auch in diesem Umstande die Ursache der Wärmeentwicklung zu sehen geneigt sein. Daß Zusammenpressung in der That Wärme erzeugen kann, sieht man, indem man ein Stück Blei langsam mittelst einer Presse komprimiert. Die dabei entwickelte Wärme ist aber so gering, daß sie sich nicht durch die Temperaturerhöhung der mit dem Bleistück in innige Berührung gebrachten Wassermasse zeigen läßt. Will man diese Temperaturzunahme nachweisen, so muß man den zusammengepreßten Körper rasch an die Thermosäule bringen; der größte Teil der bei dem Hirn'schen Versuch entwickelten Wärme muß also durch den Stoß hervorgebracht werden.

Indessen können Körper, welche wie die Gase in hohem Grade kompressibel sind, durch Zusammenpressen sehr stark erhitzt werden. So kann man Luft durch Kompression auf eine solche Temperatur bringen, bei welcher leicht brennbare Stoffe entzündet werden. Darauf beruht das pneumatische Feuerzeug, welches Fig. 118 darstellt. Es besteht aus einem unten geschlossenen,

*) Gustav Adolf H., geb. 1815 in Logelbach, ist Civilingenieur daselbst.

oben offenen Glas- oder Messingcylinder, in welchem sich ein genau schließender Kolben hin- und herschieben läßt. An der unteren Fläche dieses Kolbens kann mit Hilfe eines Häkchens ein wenig Zunder befestigt werden. Stößt man dann mit möglichster Geschwindigkeit den Kolben in das Rohr, so wird die Luft sehr stark komprimiert und das Stückchen Zunder fängt Feuer. Um die die Wärme ableitende Wirkung des Messings zu schwächen, thut man gut, das Messingrohr vor dem Versuche etwas zu erwärmen, bei einem Glasrohre ist dies nicht nötig.

Fig. 118.

Wenn man Luft sich ausdehnen läßt, so kühlt sich dieselbe beträchtlich ab. Dies kann man leicht bei Versuchen mit der Luftpumpe in dem Augenblicke beobachten, wo man unter eine luftleer gepumpte Glasglocke die Luft zurücktreten läßt. Sie kühlt sich dann so sehr ab, daß der in ihr enthaltene Wasserdampf sich zu Wasser verdichtet, und es entsteht momentan ein Nebel in der Glocke, der aber wieder verschwindet, sobald die Luft, welche bei weiterem Einströmen zu ihrer anfänglichen Dichtigkeit zurückkehrt, ihre frühere Temperatur erreicht hat. Daß sich namentlich auch komprimierte Luft bei ihrer Ausdehnung stark abkühlt, hat in überraschender Weise Papin*) zuerst beobachtet, gelegentlich seiner Versuche mit einem Taucherschiff, welches mit komprimierter Luft gefüllt worden war. Als der Hahn geöffnet wurde, durch welchen die Luft im Schiffe in die Atmosphäre ausströmte, entstand ein dichter Nebel, dessen Entstehung damals weder Papin, noch Huygens erklären konnte.

Dieselbe Erscheinung tritt aber auch in noch größerem Maßstabe in der Natur auf und ist von Helmholtz zur Erklärung des Föhns benutzt worden. Der Föhn ist ein heftiger heißer

*) Denis P., geb. 1647 in Blois, wurde nach längerem Aufenthalt in London 1688 Prof. in Marburg, siedelte 1695 nach Kassel über, ging aber 1707 nach London zurück, wo er um 1712 starb.

und überaus trockner Südwind, der namentlich in den nördlichen Thälern der Alpen zu gewissen Zeiten auftritt. Die Luftmassen, die ihn bilden, kommen aus Gegenden über dem Atlantischen Ocean und dem Antillenmeere und sind daher mit Feuchtigkeit beladen. Um die Alpen zu überschreiten, müssen sie zu bedeutenden Höhen emporsteigen, also Regionen, in denen ein sehr niedriger Luftdruck herrscht, durchziehen. Indem sie sich daselbst ausdehnen kühlen sie sich bedeutend ab und die in ihnen enthaltene Feuchtigkeit schlägt sich als Schnee nieder. Über die Kämme und durch die Pässe des Hochgebirges hineilend bewirken sie die berüchtigten Schneestürme der Alpen. Steigen sie aber dann am Nordfuße des Gebirges herab, so gelangen sie wieder in Regionen höheren Luftdruckes, werden hier komprimiert und also erhitzt, ohne aber ihren Feuchtigkeitsgehalt wieder zu erhalten. Daß der Föhn nicht in lokalen Erscheinungen seine Erklärung findet, wie man auch wohl behauptet hat, das beweist z. B. die Thatsache, daß die neuseeländischen Alpen, für welche die Verhältnisse ähnlich liegen wie für die europäischen, Veranlassung zu der nämlichen Erscheinung geben.

Außer dem Stoß und der Kompression ist die Reibung eine sehr reichlich fließende Wärmequelle. Schon wenn man die beiden Hände flach aufeinander legt und dieselben mit größter Geschwindigkeit und Kraftanstrengung gegeneinander reibt, fühlt man deutlich, wie sich ihre Innenflächen erhitzen; riecht man nachher hinein, so nimmt man deutlich den Geruch nach verbranntem Horn, von der verbrannten Oberhaut wahr. Einige Naturvölker wissen sich dadurch Feuer zu verschaffen, daß sie zwei passend ausgesuchte Holzstücke, eines von hartem, eines von weichem Holz aufeinander reiben und dadurch das letztere in Brand setzen. Unsere Zündhölzchen bringen wir ebenfalls durch Reibung auf die Entzündungstemperatur des Phosphors. Beim Schlagfeuerzeug schlägt der härtere Feuerstein von dem weicheren Stahl ganz kleine Stückchen ab, welche durch die dabei verursachte Reibung und den Stoß glühend werden, in der Luft verbrennend

in den Zunder fallen und auch diesen erglimmen machen. Die hölzernen Bremsklötze der Eisenbahnen geraten nicht selten infolge der heftigen Reibung in Brand. Ebenso sind der Gefahr heftiger Erhitzung alle Achsen ausgesetzt, welche in Lagern sehr rasch rotieren, und diese kann so groß werden, daß das Lager mit der Achse zusammenschweißt. Um den schädlichen Wirkungen dieser Wärmeentwicklung zuvorzukommen, muß man ihr Entstehen verhindern und dies ist dadurch möglich, daß man die Achsen reichlich einölt, ja bei rasch rotierenden bedarf man besonderer Vorrichtungen, die einen fortwährenden Ölstrom über die mit dem Lager in Berührung befindlichen Teile der Achse ergießen. Nur so ist man imstande ein Abschleifen und Deformieren derselben zu verhüten, und indem man sich dessen versichert, daß die Achse nicht „warm gelaufen" ist, überzeugt man sich zugleich, daß eine Gefahr der Deformation der Achse nicht vorhanden ist.

Während also die Technik stets bedacht sein muß, die durch mechanische Vorgänge entstehende Wärme unschädlich zu machen, so beruhen ihre Fortschritte fast allein auf den bedeutenden Wärmemengen, welche durch Verbrennung der Brennstoffe entstehen. Dabei findet ein chemischer Prozeß statt, der Kohlenstoff und Wasserstoff der Brennstoffe verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft und das Resultat dieser Prozesse ist die Bildung von Kohlensäure und Wasser. Eine derartige Wärmeentwicklung begleitet jedoch mit wenigen Ausnahmen jeden chemischen Prozeß. So verbindet sich z. B. Wasser mit ungelöschtem Kalk unter beträchtlicher Erhitzung, ebenso Schwefel, Phosphor mit Sauerstoff unter Feuererscheinung ꝛc. Dabei ist die Wärmemenge, welche entwickelt wird, wenn sich bestimmte Gewichtsmengen zweier Körper verbinden, unter allen Umständen die nämliche. Man kann deshalb von der Verbrennungswärme zweier Körper reden, d. h. der Wärmemenge, welche auftritt, wenn die Gewichtseinheit des einen in dem anderen verbrennt. Diese Verbrennungswärme ist meist sehr bedeutend. So entwickelt z. B. 1 Kg Wasserstoff, welches in Sauerstoff verbrennt, 34 462 Kalorien, 1 Kg Holz-

kohle unter gleichen Verhältnissen 8080,0, 1 Kg Graphit 7796,5, 1 Kg Steinkohle bester Qualität 7000, 1 Kg Schwefel 2261, 1 Kg Zink 42451 Kalorien. Dabei muß aber der Körper, wenn er in Sauerstoff verbrannt werden soll, erst auf eine bestimmte Temperatur gebracht werden, welche bei verschiedenen Körpern verschieden ist und Entzündungstemperatur heißt. Genau dieselbe Wärmemenge nun, welche bei der Entstehung einer chemischen Verbindung frei wird, muß ihr zugeführt werden, wenn sie wieder in ihre Bestandteile zerlegt werden soll. In den bei weitem meisten Fällen trennt man aber eine Verbindung zweier chemischen Elemente dadurch, daß man ein drittes auf jene einwirken läßt, welches unter Abscheidung des einen Elementes der vorhandenen Verbindung mit dem andern sich zu einem neuen Körper vereinigt. Soll dies möglich sein, so muß die dabei entstehende Wärme hinreichen um die Scheidung zu bewirken, zu welcher sie ganz oder zum Teil verbraucht wird. So wird z. B. Eisen dargestellt, indem man seine Verbindung mit Sauerstoff bei Gegenwart von Kohle erhitzt. Die letztere bildet alsdann mit dem Sauerstoff Kohlensäure, während das Eisen frei wird. Die zu dieser Trennung nötige Wärme muß aber die Verbindung von Sauerstoff mit Kohle liefern, und um dies zu ermöglichen muß das Gemenge der Eisenverbindung mit der Kohle auf deren Entzündungstemperatur gebracht werden.

Das Wesen der Wärme.

Bei der Betrachtung der Erscheinungen des Lichtes haben wir bereits auf die Thatsache hingewiesen, daß die Undulationstheorie uns bei der Erklärung jener Vorgänge im Stiche ließ, bei welchen die Körperatome eine entscheidende Rolle spielten. Dieselbe Beobachtung konnten wir bei der Wärme machen. Wir werden nun zu untersuchen haben, ob, um diese Erklärung zu geben, es genügen wird, der Undulationstheorie einige sie angemessen erweiternde Annahmen zuzufügen, oder ob wir zu Annahmen von ganz anderer Art greifen müssen.

Bis in das erste Jahrzehnt unseres Jahrhunderts hielt man die Wärme für einen Stoff, der nun freilich so fein sein sollte, daß seine Gegenwart in einem Körper durch die Wage nicht nachzuweisen war. Nach Analogie des chemischen Prozesses sollte das Erwärmen darin bestehen, daß der Wärmestoff mit dem Stoff des Körpers in Verbindung trat, ein Austreten des ersteren aus seinen Verbindungen verursachte deren Abkühlung. Die Übertragung dieses Wärmestoffes sollte bei sich berührenden Körpern durch Leitung, bei entfernteren durch Strahlung vor sich gehen. Unter Wärmekapacität aber verstand man nach dieser Ansicht die Fähigkeit der Körper mehr oder weniger Wärmestoff in sich aufzunehmen, der dann durch Kompression ganz oder zum Teil wieder ausgepreßt werden sollte. Ein komprimierter Körper mußte somit eine geringere Wärmekapacität haben im Vergleich zu derjenigen, welche er vor seiner Kompression hatte. Da nun die Wärmekapacität des Eises geringer ist, als die des Wassers, so mußte man annehmen, daß das Wasser beim Schmelzen eine gewisse Menge Wärmestoff in sich aufnehme und nannte diese latente Schmelzwärme, weil er nunmehr an das Wasser gebunden, ebensowenig eine Wirkung nach außen ausüben könne, wie eine Substanz, die mit einer andern in chemische Verbindung getreten war. Die größte Schwierigkeit machte dieser Anschauungsweise die sehr große Wärmemenge, welche bei der Reibung zweier Körper entsteht. Da die letzteren dabei ihre Eigenschaften in keiner Weise ändern, so blieb nur die Annahme übrig, daß der bei der Reibung frei werdende Wärmestoff aus den abgerissenen Teilchen der Körper stamme, daß also diese ihre Kapacität sehr bedeutend geändert haben müßten.

Es wäre nun leicht gewesen, die Richtigkeit der gemachten Annahmen dadurch zu erweisen, daß man die Wärmekapacität eines Stückes Blei vor und nach seiner Kompression prüfte oder diejenige der durch Reibung abgesplitterten Spänchen untersuchte. Aber darauf kam man nicht, bis Rumford am Ende des vorigen Jahrhunderts auf die Erhitzung aufmerksam wurde, welche ein

Kanonenrohr beim Bohren zeigte. Dabei trat ihm vor Augen, wie unwahrscheinlich es sei, daß die wenigen Späne die ungeheuere Menge Wärmestoff liefern sollten, und er beschloß, der Sache auf den Grund zu gehen. Er ließ in einem eisernen Cylinder durch zwei Pferde einen stumpfen Kanonenbohrer drehen, während Cylinder und Bohrer in ein Gefäß mit $18^3/_4$ Pfund Wasser von 15,6° C. eingesenkt waren. Innerhalb $2^1/_2$ Stunden war das Wasser bis zur Siedetemperatur erhitzt. Er bestimmte die Wärmekapacität der abgeriebenen Späne, deren Menge ungemein gering war, und fand, daß sie die nämliche war wie die des Metalles, von dem sie abgerissen worden waren. Daraus glaubte er schließen zu müssen, daß die Wärme kein Stoff sein könne, daß sie vielmehr eine Bewegung sein müsse. Nicht lange darauf machte Davy den folgenden Versuch. Er rieb im luftleeren Raum zwei Stücke Eis aufeinander und bewirkte dadurch ihre Schmelzung. Da die Kapacität des Wassers so viel größer ist als die des Eises, so konnten Teilchen des letzteren, die bei der Reibung abgerissen wurden, nicht zu Wasser werden, da sie ja selbst die Wärme, die zum Schmelzen nötig war, hätten abgeben müssen. Anderswoher konnte diese Wärme aber auch nicht stammen, da die umgebende Luft, an deren Vermittlung man hätte denken können, weggenommen war. Es blieb also nichts anderes übrig, als die Reibung als solche für die Ursache der entwickelten Wärme zu erklären, wie bei Rumfords Versuch auch, und Davy kam demnach zu demselben Schlusse wie Rumford, daß die Wärme eine bestimmte Art von Bewegung sein müsse.

Den entscheidenden Versuchen beider Forscher gegenüber konnte sich die alte Theorie nicht behaupten. Die materielle Anschauung wich mehr und mehr der dynamischen. Aber wenn man auch die Wärme als eine Art von Bewegung erkannt hatte, so war man doch noch weit davon entfernt, genau sagen zu können, welcher Art diese Bewegung sei. Die rasch fortschreitende Entwicklung der Undulationstheorie des Lichtes klärte zwar auch eine

Anzahl von Erscheinungen der strahlenden Wärme auf, aber gerade die, die von den Körperatomen beeinflußt werden, blieben dunkel. Man mußte dazu übergehen, auch diese in das Bereich der Betrachtungen hineinzuziehen. Der Versuch Rebtenbachers*), den transversalen Schwingungen des Lichtes gegenüber die Wärme für eine longitudinale Wellenbewegung zu erklären, zeigte sich als undurchführbar. Diese Ansicht konnte sich gegen die namentlich von Clausius ausgebildete mechanische Wärmetheorie nicht behaupten, die auf die Annahme transversaler Ätherschwingungen im Verein mit Schwingungen der Körpermoleküle gegründet ist.

Es kann hier nicht unsere Absicht sein, auf die Theorie, die durchweg auf mathematischen Kalkül gegründet ist, einzugehen, auch werden wir ihre Einzelheiten nicht folgerichtig hier zu entwickeln haben. Unsere Aufgabe wird vielmehr nur sein, ihre Ergebnisse zur Erklärung der Wärme- und Lichterscheinungen zu benutzen.

Die an der Oberfläche eines Körpers ankommenden Ätherschwingungen dringen, wie wir bereits sahen, zum Teil in den Körper ein. Sie treffen hier auf die Körperatome und werden durch diese in ihren Bewegungen gehemmt, indem sie denselben fortwährend Bewegungsantriebe erteilen. Diesen können die Körperatome, wie die Ausdehnbarkeit der Körper beweist, folgen, aber welcher Art werden ihre Bewegungen sein müssen? Die Betrachtung der Wärmeentwicklung durch Reibung läßt kaum eine andere Möglichkeit zu, als die, daß auch ihre Bewegungen schwingende sind. Denken wir uns nämlich zwei aufeinander reibende Flächen, so muß, da die Reibung mit der Rauhigkeit der Flächen zunimmt, dieselbe dadurch zustande kommen, daß die die Rauhigkeit bewirkenden Erhöhungen beider Körper, welche wie die

*) Jakob Ferd. R., geb. 1809 in Steyer in Österreich ob der Enns, erst Prof. in Zürich, dann in Karlsruhe, wo er 1863 starb.

Zähne zweier Zahnräder in einander greifen, bei der Bewegung entweder abgerissen oder gedehnt werden, in welch' letzterem Falle, da alle festen Körper wenigstens etwas elastisch sind, sie, losgelassen, ihre frühere Lage wieder einzunehmen suchen. Dabei werden sie aber auf die nämliche Weise, wie ein an einer sehr elastischen Kautschukschnur hängender schwerer Körper, dem durch Anziehen der Schnur Bewegung erteilt ist, vermöge des allen Körpern innewohnenden Bestrebens, in einem ihnen einmal erteilten Bewegungszustande zu verharren, über ihre Gleichgewichtslage hinausgehen, wieder wie vorhin zurückgezogen werden und somit erst zur Ruhe kommen, nachdem sie einige Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage ausgeführt haben. Daß nun ein solches schwingendes Körpermolekül die viel leichteren Äthermoleküle in Bewegung setzt, welche wiederum aus demselben Grunde nur schwingende Bewegungen ausführen können, ist leicht einzusehen. Diese Schwingungen aber würden direkt als Wärmebewegung aufzufassen sein, und so wäre die Entstehung der Wärme an den reibenden Flächen einleuchtend genug erklärt.

Um uns nun aber eine genauere Vorstellung über die Bewegungen der Körperatome und ihr Verhältnis zu den Ätherschwingungen zu bilden, betrachten wir weiter die drei Aggregatzustände etwas eingehender, als wir dies bereits gethan haben. Wir sahen sie charakterisiert durch den größeren oder geringeren Widerstand, den sie dem Zerteilen entgegensetzen. Dies verschiedene Verhalten nötigte uns zur Annahme zweier auf die Atome wirkenden Kräfte, einer anziehenden und einer abstoßenden, der Kohäsion und der Expansion. Während nun letztere die Atome von einander zu entfernen sucht mit einer Kraft, welche nur langsam mit ihrem gegenseitigen Abstand abnimmt, sucht diese sie einander stets zu nähern, und zwar mit geringer Gewalt, wenn die Atome sich nicht in nächster Nähe befinden, mit sehr rasch wachsender aber, wenn sie sich bis zu einer gewissen, sehr kleinen Entfernung genähert haben. Rücken sie noch näher aneinander, so ist die Gewalt, mit der dies geschieht, unwider-

stehlich. Die Atome treten dabei in die größtmögliche Nähe; sie bilden eine chemische Verbindung und wir können die Kraft, mit der sie sich zu vereinigen streben, nur durch eine größere überwinden, mit der andere Atome auf sie anziehend wirken, oder durch die mächtigen Wirkungen der Elektricität, oder endlich durch Anwendung höchster Hitzegrade. Bei diesen trennen sich alle chemischen Verbindungen, während ihre Bestandteile Gasform annehmen, vereinigen sich aber bei folgender Abkühlung wieder, ein Vorgang, der von Sainte-Claire-Deville*) zuerst beobachtet und mit dem Namen der Dissociation belegt ist.

Es würde nun widersinnig sein, wie wir ebenfalls früher auseinander setzten, den Sitz dieser beiden entgegengesetzt und in verschiedener Weise wirkenden Kräfte in den Atomen zu suchen. Wohl aber deutet alles darauf hin, daß die anziehende Kraft als ihnen zukommend angesehen werden muß. Dabei würde es nun freilich nicht berechtigt sein, wollten wir diese, die Atome nähernde Kraft ansehen als eine Anziehungskraft der Materie. Wie Newton die allgemeine Gravitation, d. i. die Kraft, welche die Weltkörper gegen einander hinzieht, vorsichtigerweise nur so definierte, daß sie so wirke, als zögen sich die Weltkörper gegenseitig an, so müssen wir auch unter Anziehungskraft der Atome nur eine Kraft verstehen, welche so wirkt, als zögen sich die Atome gegenseitig an, uns aber wohl hüten, aus dem Namen weitere Folgerungen auf das Wesen der Kraft herzuleiten. Leider geht man keineswegs immer mit dieser Vorsicht zu Werke, indem man übersieht, daß ja dieser Name Anziehung selbst auf einer gänzlich unbewiesenen Voraussetzung beruht, doch würde es nur verwirren, wollten wir ihn durch einen andern ersetzen. Die Expansion, die durch die Wärme vermehrt wird, mußten wir alsdann als eine von dem zwischen den Atomen befindlichen Äther ausgeübte Kraft betrachten, über

*) Henri Etienne S.-C.-D., geb. 1818 zu St. Thomas (Antillen), von 1845 Docent zu Besançon, wurde 1851 Prof. der Chemie in Paris.

deren Wesen uns die mechanische Wärmetheorie freilich etwas mehr Aufklärung zu geben imstande sein wird. Einen Körper darf man sich somit unter folgendem Bilde vorstellen. Man denke sich einen würfelförmigen Käfig aus dem feinsten, möglichst dehnbaren und elastischen Stahldraht hergestellt, so daß die Wände von einem Geflecht gebildet werden, welches einem außerordentlich grobmaschigen Flornetz gleicht. Die Außenwände desselben seien durch die gespannten Drähte in gleich große Quadrate geteilt. Man denke sich nun ferner immer zwei Eckpunkte dieser Quadrate, die sich auf verschiedenen Seiten des Käfigs gegenübertreten, durch weitere Drähte verbunden, so werden sich immer drei der letzteren in gleich weit von einander entfernten Punkten schneiden. Stellt man sich nun weiter vor, daß an jeden Kreuzungspunkt eine oder mehrere Kugeln gesetzt seien, die sich einander möglichst nahe befinden, so hat man ganz im Großen ein Bild eines Körpers, wobei man anstatt der Kugeln oder Kugelgruppen die einfachen oder zusammengesetzten Atome, anstatt der Drähte die Kohäsion, anstatt der den Käfig ungehindert durchdringenden Luft den Äther setzen muß. Inwieweit man den Maßstab dieses Bildes zu verkleinern hat, um den wahren Größen nahe zu kommen, darüber kann man bis jetzt nur ganz annähernde Annahmen machen. Für Wasser hat man die Größe der Moleküle auf 5 hundertmilliontel Millimeter, den Abstand derselben auf höchstens 186 tausendmilliontel, mindestens 50 tausendmilliontel Millimeter berechnet. Aber diesen Rechnungen liegen noch Hypothesen zu Grunde, die, wenn sie auch wahrscheinlich sind, doch noch der weiteren Begründung bedürfen.

Bringt man nun eine der Kugeln aus der Gleichgewichtslage, so wird sie durch die Wirkung der gedehnten Drähte in dieselbe zurückgezogen, aber erst nach einigen Schwingungen wieder zur Ruhe kommen. Diese Schwingungen erfolgen genau in der Weise wie die eines Pendels, und die benachbarten Kugeln werden infolge der Elasticität der Drähte an der Bewegung teilnehmen, indem sie ähnliche Schwingungen vollführen, wie die

ursprünglich bewegte. Wie nun aber die Schwingungen der Kugeln in der Luft erfolgen und somit durch die Teilchen derselben bald gehindert, bald gefördert werden müssen, so die Schwingungen der Körpermoleküle durch den Äther, den wir uns, wie wir sahen, ja auch als aus einzelnen Atomen bestehend denken müssen. Man wird freilich vielleicht Bedenken tragen, den so äußerst feinen Ätherteilchen eine Wirkung auf die ungleich massigeren Körpermoleküle zuzugestehen, aber unter gewissen Bedingungen diese Wirkung als vorhanden anerkennen müssen. Suchen wir uns dies zunächst wieder an einem Bilde klar zu machen. Bekanntlich werden die großen Glocken an einem um eine Achse drehbaren Hebel aufgehängt, an dessen anderm Ende ein weit herabreichender Strick befestigt ist. An diesem kann auch ein Knabe ohne besonderen Kraftaufwand die schwerste Glocke in Schwingungen versetzen, wenn er ihr zunächst durch Ziehen an dem Strick eine ganz schwache Bewegung mitteilt, dann aber dieselben nach und nach verstärkt, indem er jedesmal in dem Augenblicke den Strick anzieht, in welchem derselbe sich gerade wieder herabbewegt. So fortfahrend speichert er die während eines längeren Zeitraumes der Glocke erteilten Kraftimpulse gleichsam in ihrer Bewegung auf und bringt sie nach und nach zum Tönen. Um sie wieder so rasch wie möglich zur Ruhe zu bringen, hat er in dem Augenblick zu ziehen, wo der Strick wieder in die Höhe geht. Gerade so kann man eine Schaukel mit ganz schwachen Stößen, die man ihr jedesmal dann erteilt, wenn sie sich wieder anschickt, bei ihren Schwingungen sich in der Richtung des Stoßes zu bewegen, in beliebig starke Schwingungen versetzen und ähnliche Vorgänge sind es, die durch einen im richtigen Momente erteilten Druck mit dem Fuße ein Spinnrad, eine Nähmaschine, eine Drehbank, ein Velocipede ꝛc. in raschen Gang bringen und darin erhalten, aber auch diejenigen, welche auf ein Körperatom die schwingende Bewegung eines Ätheratomes übertragen. Damit diese Wirkung eintrete, müssen beide eben nur so schwingen, daß jedesmal in dem Augenblick, in dem das Körperatom sich zur Umkehr an-

schickt, das Ätheratom ihm einen Stoß in der nämlichen Richtung erteilt.

Mit Hilfe der so gewonnenen Resultate ergeben sich nun die Erklärungen der durch die Undulationstheorie des Lichtes noch nicht aufgeklärten Erscheinungen von selbst. Soll das Körpermolekül in intensive Schwingung geraten, so wird es in solchem Rhythmus schwingen müssen, daß die eben erörterte Bedingung erfüllt ist. Nicht jede Art von Ätherschwingung wird also geeignet sein, die Moleküle eines Körpers zum Mitschwingen zu veranlassen, sondern nur solche, die nach einer gewissen Zahl von Ätherschwingungen mit denselben gleichzeitig eine neue Schwingung beginnen. Solche werden dann aber ihre Kraft an die Körpermoleküle übertragen, ihre Bewegung und damit das Licht oder die Wärme, die sie hervorrufen könnten, wird absorbiert. Da aber dafür die Körpermoleküle in Bewegung geraten sind, so werden diese nun die Ätherteilchen wieder in Bewegung setzen müssen. Dabei wird der Bewegungszustand, in welchem die Körpermoleküle sich bereits befinden, also ihre Temperatur, von Bedeutung sein. Die vorhandenen Schwingungen werden verstärkt und dies setzt die Moleküle auch wieder in den Stand, ihre Schwingungen auf den Äther zu übertragen, namentlich wenn dieselben sehr rasch und heftig erfolgen, wenn die Körper glühend sind. Man wird so zu der von Kirchhoff gezogenen Folgerung gelangen, daß eine Substanz bei einer gegebenen Temperatur stets Strahlen solcher Art aussendet, welche sie auch zu absorbieren imstande ist. Schwingen dabei die Körperatome langsamer, so wird es möglich sein, daß sie den Ätheratomen ebenfalls langsamere Schwingungen aufnötigen, daß Fluorescenz eintritt. Da sie ferner die Äthermoleküle ohne großen Kraftaufwand in Schwingungen versetzen können, so wird der ihnen erteilte Kraftvorrat länger anhalten als ihre Bestrahlung dauert, sie werden auch, wenn diese aufgehört hat, fortfahren auszustrahlen, die Erscheinung der Phosphorescenz des Lichtes und der Wärme wird eintreten. Sind dagegen die Schwingungen der Körpermoleküle der Art, daß sie

in anderm Rhythmus als die Äthermoleküle vor sich gehen, so kann zunächst Fluorescenz eintreten, wenn die oben abgehandelten Bedingungen der Übertragung wenigstens annähernd erfüllt sind; ist dies nicht der Fall, so dringen die Schwingungen des Äthers zum Teil gar nicht in den Körper ein, sie werden reflektiert oder sie gehen, allerdings gehindert, hindurch, sie werden gebrochen. Dabei werden in der einen Richtung schwingende Strahlen gebrochen, die in der darauf senkrechten sich bewegenden reflektiert werden. Die schwingenden Körpermoleküle aber werden nun benachbarte ebenfalls zu den nämlichen Schwingungen anregen, und so die Wärme gut leiten, wenn sie leicht in schwingende Bewegung zu setzen sind; sie werden dies nicht können, wenn sie diese Fähigkeit nicht besitzen und also schlechte Leiter der Wärme darstellen. Die Moleküle einiger Körper, die leichter beweglich sind als die anderer, werden endlich durch nicht lange andauernde Schwingungen, also durch geringe Wärmemengen in Bewegung gesetzt werden, unbeweglichere dagegen hierfür länger andauernder Antriebe bedürfen, die Wärmekapacität der Körper muß folglich eine verschiedene sein.

Erwärmt man nun einen Körper, so setzt man seine Moleküle in immer stärkere Bewegung, dazu bedarf aber jedes einzelne einen größeren Raum, wie eine Schulter an Schulter gedrängt stehende Menschenmenge einen viel größeren Raum einnehmen wird, wenn ein jedes Individuum derselben pendelnde Bewegungen des Oberkörpers ungehindert durch seine Nachbarn nach allen Richtungen soll ausführen können, und so würde sich die Ausdehnung der Körper durch die Wärme erklären. Da dabei die Schwingungen der Moleküle stärker werden, so tritt zugleich Temperaturerhöhung ein. Kühlt sich ein Körper ab, so geschieht dies, indem seine Moleküle ihre Bewegung an die Ätheratome übertragen und die Bewegung dieser sich in den außerhalb des Körpers befindlichen Äther verliert. Der Körper strahlt dann Wärme aus.

Weniger klar ist man bis jetzt über die molekulare Änderung, welche die latente Schmelz- und Verdampfungswärme bewirken. Da bei den festen Körpern die Kohäsion stärker sein

muß als die Expansion, bei den Flüssigkeiten beide aber sich nahezu im Gleichgewicht halten müssen, so muß die latente Schmelzwärme dazu verwendet werden, eine andere Lagerung der Moleküle zu bewirken, also den Körpermolekülen eine weiter ausgreifende Bewegung zu erteilen. Welcher Art diese Bewegung ist, kann man aus gewissen Vorgängen bei der Zersetzung der Flüssigkeiten durch den elektrischen Strom und einer ganz abweichenden Eigenschaft des Wassers schließen. Leitet man einen elektrischen Strom durch eine Flüssigkeit, z. B. Wasser, so entwickelt sich an der Stelle, wo der Strom eintritt, der eine chemische Bestandteil derselben, bei Wasser der Sauerstoff, an der Austrittsstelle tritt dagegen der andere Bestandteil auf, in unserem Beispiele also der Wasserstoff. Dabei kommt es auf die Entfernung der Ein- und Austrittsstelle des Stromes ganz und gar nicht an, zwischen beiden aber befindet sich stets Wasser. Um die Bestandteile des Wassers zu entwickeln, muß es aber der elektrische Strom in dieselben zerlegen. Da also, wo Sauerstoff auftritt, müßte gleichzeitig Wasserstoff auftreten. Das ist aber nicht der Fall. Da nun der an der Eintrittsstelle entwickelte Wasserstoff nicht verschwinden kann so muß er sich sofort mit dem Sauerstoff des benachbarten Wassermoleküls wieder zu Wasser verbinden, der dadurch wiederum frei werdende Wasserstoff ebenso, bis schließlich der Wasserstoff des an der Austrittsstelle befindlichen Moleküls mit dem hier sich entwickelnden Atom Sauerstoff wieder Wasser bildet und somit ein Atom Wasserstoff frei wird. Auf der ganzen Strecke zwischen der Ein- und Austrittsstelle des elektrischen Stromes findet also chemische Zersetzung und Neubildung statt, trotzdem sehen wir nichts davon, das Wasser bleibt daselbst, was es war. Ebenso wie in dem vorgeführten Beispiel sind derartige Erscheinungen nun in allen Flüssigkeiten möglich, die Atome können also in diesem Aggregatzustand nicht in fester Verbindung verharren, die Wassermoleküle tauschen ihre Bestandteile leicht gegen die anderer aus und ihre Bewegung wird somit ein sich um einander Herum-

wälzen sein. Anstatt der pendelartigen Schwingungen der Atome der festen Körper müssen also die der flüssigen um einander rotierende Bewegungen ausführen.

Von dieser Voraussetzung aus läßt sich nun auch leicht die sonderbare Eigenschaft des Wassers erklären, sich beim Schmelzen plötzlich, bei danach fortgesetzter Erwärmung langsam bis zu einer Temperatur von 4°,1 C zusammenzuziehen und von da an erst wie andere Körper auch sich auszudehnen. Da mit dieser Zusammenziehung eine höhere Temperatur, also auch eine stärkere Bewegung der Moleküle verbunden ist, so läßt sie sich nur durch die Annahme erklären, daß sie eine wirbelförmig rotierende sei, die sich bei geringer Verstärkung auf einen kleineren Raum beschränkt und erst, wenn sie bedeutend stärker wird, diesen Raum erweitert. Diese merkwürdige Eigenschaft des Wassers ist schuld, daß das Eis schwimmt und dadurch alljährlich bei zunehmender Lufttemperatur und Wärmewirkung der Sonne rasch schmelzen oder fortgeführt werden kann. Verhielte sich das Wasser wie die Mehrzahl der andern Körper, so würde das Eis sich am Boden der süßen Gewässer anhäufen und bei der geringen Durchlässigkeit des darüber lagernden Wassers für Wärmestrahlen im Laufe eines Sommers kaum wieder zu Wasser werden können, was eine Vereisung der Bäche, Flüsse und Seen mit der Zeit zur Folge haben müßte. Beim Gefrieren dehnt nun umgekehrt das entstehende Eis sich aus, sprengt dabei Gefäße, die nicht napfförmig gestaltet sind, bröckelt Felsstücke und -stückchen ab, indem es in deren Spalten friert, oder zertrümmert feste Erdschollen und wird so Veranlassung des Verwitterungsprozesses an der Erdoberfläche, der bei der Schneeschmelze beträchtliche Gesteinsmassen, die Gebirge benagend, in die Thäler führt, den der Froste ausgesetzten frischgepflügten Acker aber lockert und durch die so beförderte Oxydation mehrere seiner Bestandteile für das Wachstum der Pflanzen brauchbar macht. Das Meerwasser erreicht das Maximum seiner Dichte nahezu bei 0° C, doch liegt sein Gefrierpunkt tiefer, für dieses würden jene Folgerungen aber

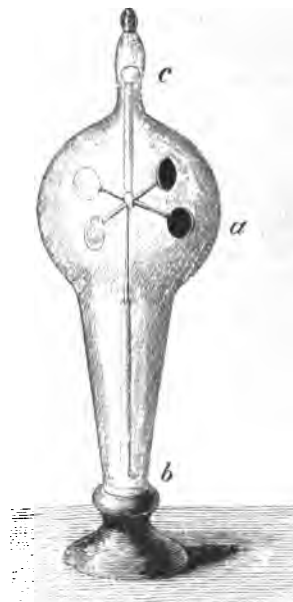
schon deshalb nicht gelten, weil nur das Wasser aus ihm herausfriert, das Meerwasser somit als eine konzentriertere Salzlösung zurückbleibt, in der das Eis unter allen Umständen schwimmen würde. Außer dem Wasser wird das Wismut beim Erstarren ausgedehnt und darauf beruht seine Verwendung als Letternmetall, dessen Wismutgehalt bewirkt, daß es sich beim Erstarren in die Form hineindrückt, und so, indem es diese sehr genau ausfüllt, einen besonders scharfen Abdruck derselben herstellt.

Ähnlich dem Vorgange des Schmelzens ist der des Verdampfens. Die Moleküle des Körpers müssen dabei zunächst viel weiter von einander entfernt werden, als sie es im flüssigen Zustande sind, und gleichzeitig muß die rotierende Bewegung der Atome mehr und mehr in eine geradlinig fortschreitende übergehen. Damit dies möglich ist, muß die Kohäsion bis zur vollständigen Wirkungslosigkeit überwunden werden, und zu allen diesen Vorgängen gehört Wärme, die beim Sieden zu verschwinden scheint, die latente Verdampfungswärme. Es wird später auseinandergesetzt werden, warum wir jedoch nicht annehmen dürfen, daß mit dem Verdampfen die Kohäsion mit einem Male überwunden wird, sondern daß dazu noch weitere Wärmezufuhr, die den verdampften Körper noch mehr ausdehnt, notwendig ist. Erst wenn ihre Wirkung vollständig unmerklich geworden ist, kann die Bewegung der Moleküle eine geradlinig fortschreitende werden. Dann nennen wir den Körper ein Gas, vorher einen Dampf. Die Bewegung eines Gasmoleküls geht demnach so lange ungehindert fort, bis sich ein anderes Molekül entgegenstellt. Ist dies der Fall, so stößt es auf dasselbe und ändert nach Maßgabe der Art des Stoßes seinen Weg fort. Die Bewegung der Gase hängt demnach nur von der Wärme, nicht sehr vom Stoffe ab. Durch dies theoretische Resultat wird einesteils, zu welcher Folgerung wir bereits auf anderm Wege gekommen waren, die Anwendung des Luftthermometers zur Korrektion aller andern Thermometer gerechtfertigt, als dadurch

auch andererseits die Gase als besonders geeignet erkannt werden, um die Gesetze der Wärme zu studieren.

Einen interessanten Beleg für das Vorhandensein dieser geradlinig fortschreitenden Bewegung der Gasmoleküle giebt das Radiometer von Crookes. Dasselbe besteht in seiner gewöhnlichen Form aus einem kleinen birnförmigen, möglichst luftleer gemachten Glasgefäß a, Figur 119, in welchem ein Kreuz von Aluminiumdrähten auf der Spitze einer bei b eingeschmolzenen Stahlnadel so schwebt, daß es sich in seiner (horizontalen) Ebene nach allen Richtungen leicht drehen kann. Die vier Aluminiumarme tragen leichte Scheibchen von Glimmer oder Hollundermark, deren eine Seite mit Ruß geschwärzt ist, so daß die geschwärzten Flächen bei der Drehung der Arme zugleich sich vorwärts oder rückwärts bewegen. Um beim Transport des Apparates das Herabfallen des Kreuzes von der Nadelspitze zu verhindern, ist bei c ein Glasstäbchen eingeschmolzen, das in ein Hütchen ausläuft, welches den in ein ebensolches aufgebogenen Teil des Aluminiumkreuzes so umfaßt, daß dieses sich zwar ungehindert drehen, aber unter keinen Umständen von der Spitze herabfallen kann. Läßt man nun Licht oder Wärmestrahlen auf den Apparat fallen, so absorbiert die berußte Fläche dieselben in größerer Menge, als die an dem andern Ende des nämlichen Armes befindliche weiße. Sie erwärmt sich dadurch stärker und mit ihr die zunächst liegenden Luftteilchen. Diese geraten dadurch in

Fig. 119.



heftigere, von der warmen Fläche abgewandte Bewegung und, wie ein aus einem Kahn springender Mann zugleich den Kahn zurückschleudert, so stoßen die wegfliegenden Gasteilchen nunmehr die schwarze Scheibe stärker zurück als die weiße, und das Kreuz setzt sich in Rotation. Durch den Stoß gegen das gegenüberliegende Stück der Gefäßwand verlieren dann diese Gasmoleküle den größten Teil ihrer Bewegung und hindern so die ihnen nachfolgenden nur wenig an der ihrigen. Ist die Luft in a weniger verdünnt, so entsteht an der berußten Fläche ein aufsteigender Luftstrom; die sich von dort wegbewegende Luft zieht alsdann die Luft von allen Seiten herbei, die hinter der Scheibe befindliche drängt diese vor und es tritt eine Rotation im entgegengesetzten Sinne ein, eine Form des Versuchs, die bereits im vorigen Jahrhundert bekannt war. Dies ist die annehmbarste Erklärung des Phänomens, die aber noch nicht allgemein angenommen ist.

Lediglich eine Folge aus der Thatsache, daß die Bewegung der Gasmoleküle bei allen Gasen in derselben Weise erfolgt, ist die Gleichheit der Ausdehnungskoefficienten aller Gase. Da dieselben sämtlich den Wert von 0,003665 haben, so dehnt sich ein Gas um 0,003665 seines Volumens aus, wenn seine Temperatur um 1° erhöht wird. Das umgekehrte würde erfolgen, wenn man die Temperatur des Gases erniedrigte. Kühlten wir nun die Einheit des Volumens eines Gases immer mehr ab, so würde für jeden Grad, um den seine Temperatur sänke, 0,003665 seines Volumens abgezogen werden. Dies geht in runder Zahl 273 mal. Bei — 273° würde also sein Volumen auf 0 zusammengeschrumpft, jede Bewegung seiner Moleküle erloschen sein. Da alsdann aber auch alle Wärme ihm entzogen wäre, so nennt man diese Temperatur die des absoluten Nullpunktes und bezeichnet die von ihm aus gerechneten Temperaturen als absolute Temperaturen. Erwärmt man demnach ein Gas von beliebiger absoluter Temperatur um eine bestimmte Anzahl Grade, so wird, wenn sich der Druck, unter dem es steht, nicht ändert, sein Volumen um ebensovielmal 0,003665 zunehmen und es

ergiebt sich so das von Charles*) zuerst gefundene, gewöhnlich nach Gay Lussac**) genannte Gesetz, daß bei ungeändertem Drucke die Volumina derselben Gasmengen in demselben Verhältnis wie die absoluten Temperaturen wachsen oder abnehmen müssen. Man wird jedoch nicht übersehen, daß aus der Beobachtung der Ausdehnung der Gase bei den von uns erreichbaren Temperaturen die Folgerung gezogen werden müßte, daß ein Gas bei — 273° C gar keine Ausdehnung mehr hätte. Das ist natürlich nicht möglich. Unsere Ergebnisse gelten aber auch streng genommen nur, wenn die von uns innerhalb bestimmter Grenzen abstrahierten Gesetze auch über diese Grenze hinaus giltig bleiben, was wir eben nicht wissen. Nur unter dieser Beschränkung sind die obigen Folgerungen, die dessenungeachtet von höchster theoretischer Bedeutung sind, anzunehmen. Daß übrigens Zustände, wie sie dem absoluten Nullpunkt entsprechen, in dem Teile des Weltenraumes, von dem wir Kunde haben, nirgends stattfinden können, ergiebt sich daraus, daß bei jener Temperatur keine Bewegung der Körper- und Äthermoleküle mehr stattfinden, also weder Licht, noch Wärme vorhanden sein könnte.

Auch die Erklärung der Wärmewirkung beim chemischen Prozeß macht nunmehr keine Schwierigkeit. Die Atome nähern sich bei demselben so sehr, wie überhaupt möglich ist. Dabei üben sie aber zusammenfahrend gegenseitig einen kräftigen Stoß aufeinander aus und müssen dadurch in heftige Schwingungen geraten. Der zwischen ihnen befindliche Äther wird gleichzeitig herausgepreßt und muß seinerseits auch in Bewegung kommen, der ganze Vorgang muß also mit intensiver Wärmeentwicklung verbunden sein.

Ebenso leicht erklären sich endlich die Vorgänge der Wärmeentwicklung durch Stoß und Verdichtung. Beim Zusammenstoßen

*) Jaques Alexandre César Ch., geb. 1746 in Beaugency, war Beamter im Finanzministerium, später Prof. in Paris, wo er 1823 starb.

**) Louis Josef G. S., geb. 1778 in St. Léonard, Limousin, war Prof. in Paris, wo er 1850 starb.

zweier Körper werden die aufeinander treffenden Moleküle derselben plötzlich in ihrer fortschreitenden Bewegung gehemmt. Die andern dagegen setzen infolge ihres Beharrungsvermögens ihren Weg noch weiter fort, werden aber dann durch die Anziehung der ersteren wieder zurückgetrieben; hierbei müssen alle Moleküle in heftige Schwingungen geraten, der Körper stark erwärmt werden. In analoger Weise kommt die Wärmeentwicklung durch Kompression eines Gases zustande. Die einander gewaltsam genäherten Gasteilchen werden von denen, auf welche sie treffen, zurückgeschleudert, sie geraten dadurch in heftige Schwingungen, die um so schneller werden müssen, je kleiner der Raum ist, durch welchen sie sich bewegen können; haben sie eine gewisse große Geschwindigkeit erreicht, so können ihre Schwingungen, an denen der Äther teilnehmen muß, auch für das Auge als Licht sichtbar werden. Die Temperatur, die sie dann erlangen, reicht vollständig aus, um Zunder zu erhitzen. Beim Ausdehnen aber findet der entgegengesetzte Vorgang statt.

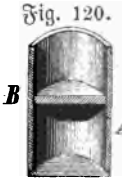
Das Prinzip der Erhaltung der Kraft.

Eine Folgerung aus der eben auseinandergesetzten Theorie ist nun, daß eine in einem geschlossenen Gefäße befindliche Gasmenge, da sie stets bestrebt ist, vermöge der geradlinig fortschreitenden Bewegung ihrer Teilchen einen größeren Raum einzunehmen, auf die Wände ihres Gefängnisses einen Druck ausüben wird. Jede Ursache aber, welche die Bewegung der Gasteilchen verstärkt, wird auch diesen Druck verstärken, derselbe wird also durch Erwärmung beträchtlich, möglichenfalls zu beliebiger Höhe gesteigert werden können. Denkt man sich nun die eine Wand des Gefäßes beweglich, etwa so, daß man, wie die Fig. 120 darstellt, in den gut ausgeschliffenen Cylinder A einen luftdicht schließenden Kolben B einsetzt — die Figur stellt beide in der Mitte durchschnitten dar, um das Innere des Gefäßes sichtbar zu machen — so wird der Druck des Gases den Kolben emportreiben und ein darauf gestelltes Gewicht mit zu heben ver-

mögen. Dadurch aber wird die Molekularbewegung in die Bewegung eines Körpers, in die Hebung eines Gewichtes verwandelt, und da die erstere dabei mehr oder weniger zur Ruhe kommt, oder doch an Intensität verliert, das Gas im Cylinder A also sich abkühlt, so gelangen wir zu dem erfahrungsmäßigen Satze, daß man mit Hilfe von Wärme mechanische Wirkungen hervorrufen, die Wärme direkt in solche Wirkungen verwandeln kann.

Nun hatten die oben erwähnten Versuche Rumfords gezeigt, daß dieser Satz auch umgekehrt gilt, daß man mit Hilfe von mechanischen Vorgängen auch Wärme erzeugen kann. Sobald man sich aber der Umkehrbarkeit des Satzes bewußt wurde, war die weitere Folgerung nicht abzuweisen, daß dann ein bestimmtes Wertverhältnis zwischen Wärme und mechanischer Kraft vorhanden sein muß, ähnlich wie dasjenige zwischen Geld und Ware, oder daß eine gegebene Kraftmenge eine bestimmte Wärmemenge hervorrufen könne und umgekehrt. Wie notwendig diese Folgerung war, beweist der Umstand, daß unabhängig von einander vier Gelehrte nahezu gleichzeitig auf dieselbe kamen, Mayer*), Helmholtz, Joule**) und Colding***). Mayer aber war es, der sie zuerst 1842 in einer kleinen Abhandlung öffentlich aussprach, welche freilich ganz und gar unbemerkt blieb. Erst nachdem Helmholtz das neue Prinzip theoretisch begründet und die aus ihm sich ergebenden Schlüsse gezogen, Joule die Richtigkeit dieser theoretischen Resultate durch bewunderungswürdige Versuche erwiesen hatte, erregte auch Mayers Abhandlung das Interesse, welches sie in hohem Grade verdiente. Daß ihm, der das Gesetz zuerst

Fig. 120.



*) Jul. Rob. M., geb. 1814 in Heilbronn, machte als Schiffsarzt eine Reise nach Java, war später Arzt in Heilbronn, wo er 1879 starb.

**) James Prescott J., geb. 1818 in Manchester, Brauereibesitzer in Salford bei Manchester.

***) Ludw. Aug. C., geb. 1815 auf Seeland, ist Inspektor der Wasserwerke in Kopenhagen.

öffentlich aussprach, der Ruhm, es aufgefunden zu haben, gebührt, wird jetzt allgemein anerkannt.

Zum Verständnis dieses Gesetzes diene zunächst folgendes: Jedermann weiß, daß eine Bewegung immer das Resultat der Wirkung einer Kraft ist, daß ohne Kraft keine Bewegung eintreten kann. Nur aus diesen ihren Wirkungen können wir das Dasein von Kräften erkennen; üben sie solche Wirkungen nicht aus, so existieren sie für uns nicht. Diese Wirkungen können nun aber zweierlei Art sein, die Kraft kann einem Körper eine Bewegung erteilen, wie die Kraft des explodierenden Schießpulvers dem Geschosse, oder sie kann eine andere Kraft verhindern, eine solche Wirkung auszuüben, wie die Kraft eines Menschen thut, welcher die Schwerkraft eines beliebigen Körpers davon zurückhält, diesen eine nach dem Mittelpunkt der Erde gerichtete Bewegung ausführen zu lassen. Jeder Körper ist nun vermöge seiner Schwerkraft imstande, die Wirkung irgend einer Kraft aufzuheben. Hiervon ausgehend, sagt man von zwei beliebigen Kräften, die ihre Wirkungen gegenseitig vernichten, daß sie sich das Gleichgewicht halten. Die Größe einer jeden Kraft können wir also mit der Schwerkraft von Körpern vergleichen, und da uns das Gewicht eines Körpers die Stärke der an ihn angreifenden Schwerkraft giebt, so ist das Gewichtsmaß zugleich das Kraftmaß.

Von einer Kraft nun, welche wie diejenige eines einen Wagen ziehenden Pferdes einem Körper eine Bewegung erteilt, sagt man, sie arbeite, und wie das Wort selbst von der hierzu vorhandenen Fähigkeit menschlicher oder tierischer Muskeln genommen ist, so ergiebt sich aus den nämlichen Erfahrungen auch der Begriff dessen, was wir Arbeit der Kraft nennen. Gehen wir, um denselben weiter zu beleuchten, von der Erhebung eines Körpers von bestimmtem Gewichte auf eine bestimmte Höhe aus, so ist es klar, daß wir uns mehr anstrengen müssen, sowohl wenn wir einen schwereren Körper auf dieselbe Höhe wie einen leichteren heben sollen, als auch wenn von zwei gleich schweren Körpern der eine zu größerer Höhe emporzubringen ist. Man

hat also bei der Schätzung der Arbeit, welche verrichtet werden muß, um einen Körper empor zu heben, einmal das Gewicht desselben und dann die Höhe, auf die er gehoben worden ist, zu berücksichtigen. Vergleichen wir demnach die Arbeiten verschiedener Kräfte mit derjenigen, welche erforderlich ist, um 1 Kg 1 m hoch zu heben, der Arbeitseinheit, so läßt sich diese Arbeit z. B. 60mal verrichten, indem man von 60 Kg ein jedes 1 m hoch hebt, aber auch, indem man von 6 Kg jedes 10 m oder von 3 Kg jedes 20 m hoch hebt u. s. w. Die von einer Kraft verrichtete Arbeit wird demnach erhalten, wenn man das von ihr bewegte Gewicht mit dem zurückgelegten Weg multipliziert. Da man die Arbeitseinheit Kilogrammeter zu nennen pflegt, so erhält man auf diese Weise die Arbeit in solchen. Hieraus folgt nun, daß die Apparate, mit deren Hilfe eine kleine Kraft große Lasten heben kann, z. B. eine geneigte Bahn, wie sie die alten Egypter benutzten, um die größten Quadersteine auf die Höhen der Pyramiden zu bringen, oder ein Hebel, ein Flaschenzug ꝛc., uns nicht in den Stand setzen, Arbeit zu gewinnen. Bei allen diesen Apparaten legt die größere Last einen ebensovielmal kleineren Weg zurück, als die sie bewegende Kraft kleiner ist als sie. Das Produkt aus Last und Weg ist also auch hier gleich dem Produkt aus Kraft und Weg. Es ist die Geschwindigkeit der Bewegung der Last zu Gunsten ihrer Größe geopfert, die Arbeit aber ist auf beiden Seiten dieselbe geblieben. Mit Hilfe einer gegebenen Wärmemenge läßt sich nun eine Arbeit von begrenzter Größe verrichten, und umgekehrt ist diese Arbeit fähig dieselbe Wärmemenge wieder hervorzurufen, Wärme und Arbeit sind äquivalent. Nach Mayers Vorgang nennt man diejenige Arbeit, welche einer Kalorie äquivalent ist, das mechanische Äquivalent der Wärme und die Wärme, welche die Arbeit von 1 Kilogrammmeter verrichten kann, das Wärmeäquivalent der Arbeit. Kennt man einen dieser Werte, so hat man ihn nur in 1 zu dividieren, um den andern zu finden. Mayer hat ihn zuerst bestimmt, doch waren die Versuche, die er zu diesem Zwecke

anstellte, viel weniger zahlreich und genau als die Joules, welche dasselbe Ziel verfolgten. Die größte Schwierigkeit bei denselben lag darin, daß es nicht möglich ist, die Umwandlung von Arbeit in Wärme oder umgekehrt vollständig vorzunehmen. So ließ z. B. Joule durch ein sinkendes Gewicht einen eisernen Rührapparat in Bewegung setzen, der sich durch Quecksilber hindurch bewegend dieses erwärmte. Das an einem Seile aufgehängte Gewicht mußte die Seile biegen, die Reibung an den Achsen der Rollen und den Luftwiderstand überwinden und traf endlich mit kräftigem Stoße den Boden. Alle diese Vorgänge erforderten Arbeit, die das Gewicht leistete, die also nicht als Wärme auftrat. Dadurch aber, daß sie Joule in Rechnung brachte, gelang es ihm, mit großer Genauigkeit das mechanische Äquivalent der Wärme zu 424 Kilogrammeter zu bestimmen, so daß es also möglich sein würde mit 1 Kalorie 1 Kilogramm 424 m hoch zu heben, wenn keine Verluste durch Reibung, Luftwiderstand ꝛc. einträten. Übrigens hatte Carnot*) bereits 1824 darauf aufmerksam gemacht, daß nur dann Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann, wenn sie von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergeht.

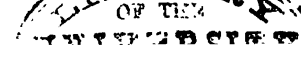
Die durch diese Versuche geschaffenen neuen Anschauungen waren es nun, welche die Ansichten über die Wärme, die man früher hatte, von Grund aus reformierten. Konnte doch Wärme nur dann in Bewegung verwandelt werden, wenn sie selbst bereits Bewegung, wenn auch molekulare Bewegung war, und so wurden die Arbeiten zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents der Ausgangspunkt der mechanischen Wärmetheorie, welche, wie der vorige Abschnitt gezeigt hat, die Wärme als eine Art der Bewegung auffaßt und von dieser Anschauung aus alle Wärmeerscheinungen in höchst befriedigender Weise zu erklären vermag. Durch die theoretischen Arbeiten von Helmholtz, die auch von dieser Anschauung anhoben, wurde nun aber eine noch viel weitere Perspektive eröffnet. Helmholtz knüpfte an die mehrfach

*) Sadi C., geb. 1796 in Paris, war Ingenieur-Kapitän; er starb 1832 in Paris.

gemachten Erfahrungen an, daß Wärme auch in Elektricität verwandelt werden kann, daß aber dasselbe, wie dies jede Elektrisiermaschine zeigt, auch von der mechanischen Kraft gilt, daß man endlich imstande ist, die Elektricität durch einen chemischen Prozeß, welcher in den galvanischen Elementen vor sich geht, zu erzeugen. Er wies nun nach, daß auch hier das Gesetz der Äquivalenz gilt. In den gebräuchlicheren Elementen findet, so lange der elektrische Strom entwickelt wird, ein chemischer Prozeß statt, indem Zink sich in verdünnter Schwefelsäure auflöst. Für jede aufgelöste Gewichtseinheit Zink erhält man nun ein gewisses Quantum Elektricität und dieses kann wieder, wenn man es durch Wasser leitet, soviel davon zersetzen, daß die so gebildete Menge Sauerstoff gerade groß genug ist, um mit dem aufgelösten Zink Zinkoxyd zu bilden. Dabei würde wieder eine gewisse Quantität Wärme entstehen, mit deren Hilfe dann wiederum mechanische Kraft hervorgerufen werden könnte. Mittelst dieser aber könnte man in einer sogenannten Dynamo- oder magnet-elektrischen Maschine, wie sie Werner Siemens*) konstruiert hat, einen Strom erzeugen, welcher dann wieder in Wärme, elektrisches Licht u. s. w. umgewandelt werden kann. Man sieht, der chemische Prozeß, Wärme, Elektricität, mechanische Arbeit sind nur verschiedene Formen, in denen Kraft auftreten kann, welche bald Arbeit im Großen, bald im Kleinen verrichtet, aber niemals aufhören kann zu sein, sondern nur dadurch irgendwo verschwinden, daß sie in einer andern jener Formen wieder auftritt. Diesem neuen Prinzip hat man deshalb den Namen des Prinzips der Erhaltung der Kraft oder besser der Energie gegeben.

Die Möglichkeit der Verwandlung von Arbeit in Wärme, in Elektricität und zurück scheint nun aber auf den ersten Blick eine Rechtfertigung jenes Apparates, der im 17. und 18. Jahr-

*) Werner S., geb. 1816 in Lenthe bei Hannover, war anfangs Artillerieoffizier, wurde als solcher in die Kommission für Einführung der elektrischen Telegraphen in Preußen gewählt, trat 1849 aus dem Staatsdienst und gründete mit Halske eine Telegraphenbauanstalt.



hundert das unerreichte Ziel der Arbeiten so vieler unklaren Köpfe war, das in solchen immer und immer wieder auftaucht, eine Rechtfertigung des Perpetuum mobile zu enthalten. Darunter denkt man sich einen Mechanismus, der, einmal in Bewegung gesetzt, stets diese Bewegung beibehält. Da dieser dann ohne Kraft- oder Wärmeaufwand, also anhaltend Arbeit würde verrichten können, Arbeit aber Geldwert besitzt, so darf man die Frage nach seiner Herstellung wohl ein Suchen nach dem Stein der Weisen in anderer Form nennen. Das Mißlingen der vielen Versuche, diesen Apparat herzustellen, hatte gegen das Ende des vorigen Jahrhunderts den Glauben an seine Möglichkeit längst erschüttert. Das Prinzip der Erhaltung der Kraft hat denselben durchaus nicht wieder befestigt, vielmehr haben die Versuche, die man anstellte, um das mechanische Wärmeäquivalent zu finden, die Unmöglichkeit einer solchen Einrichtung klar dargethan. Bei jeder Maschine finden nämlich, wie wir es bei dem Joule'schen Versuche sahen, Arbeitsverluste durch Reibung der Achsen, Luftwiderstand ꝛc. statt. Das Verhältnis der Arbeit, welche sie nutzbar machen, zu derjenigen, welche zu ihrem Betriebe erforderlich ist, ihr Nutzeffekt oder ihr Güteverhältnis, ist also immer kleiner als 1. Die Arbeit, welche zur Deckung jener Verluste verrichtet werden muß, kann nun unter keinen Umständen wieder gewonnen werden, man muß also auf den Betrieb jeder Maschine mehr Arbeit verwenden, als man von ihr wieder verrichten lassen kann. Wie nun ein Kapital, von dem man jährlich eine seine Zinsen überschreitende Summe zu seiner Verwaltung nimmt, schließlich gänzlich aufgezehrt wird, ebenso muß auch der Arbeitsvorrat, welcher einem solchen Apparate von Anfang an erteilt worden war, indem man ihm als Betriebskraft die Spannung einer Feder oder eine auf eine gewisse Höhe gehobene Wasser- oder Queckſilbermenge ꝛc. mitgab, schließlich aufgebraucht werden, der Apparat wird während seines Ganges die Feder immer mit geringerer Kraft wieder anspannen, oder immer weniger Wasser wieder zu der früheren Höhe erheben können, bis er aus Mangel

an bewegender Kraft zur Ruhe kommt, er mag nun sonst konstruiert sein, wie er will. Die Idee des Perpetuum mobile beruht somit auf einer Verwechslung der Begriffe von Kraft und Arbeit und ist eine Unmöglichkeit, als welche der Apparat sich auch stets herausgestellt hat.

Veränderung des Aggregatzustandes.

Der Satz von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit hat nicht nur eine vollkommene Umwälzung der theoretischen Anschauungen in der Physik und Mechanik hervorgebracht, er bewirkte eine ebensolche in den Anschauungen und Anwendungen der Technik. Benutzt doch die wichtigste Kraftmaschine die Kraft, welche ein erhitzter Dampf vermöge seiner Expansion auszuüben imstande ist; sie ist also lediglich eine Anwendung des genannten Prinzips. Die Vorgänge beim Übergange eines Körpers aus einem Aggregatzustande in den andern, zu deren Betrachtung wir uns nunmehr wenden, haben deshalb sowohl in theoretischer, wie praktischer Beziehung die allergrößte Bedeutung.

Führt man einem festen Körper Wärme zu, so wird sich derselbe ausdehnen. Hierbei wird er im allgemeinen eine Arbeit verrichten, sei es, daß er nur den Luftdruck um den Betrag der Ausdehnung zurückdrängt, sei es, daß er außerdem noch ein Gewicht hebt ꝛc. Diese sichtbare Arbeit wird äußere Arbeit genannt; die zu ihrer Verrichtung nötige Wärme kann man wieder gewinnen, wenn man die durch dieselbe ausgeführten Bewegungen rückgängig macht. Sie wird vom Körper ausgestrahlt, wenn er sich wieder bei der Abkühlung zusammenzieht, sie kann aber auch durch Kompression in der dabei auftretenden Erhitzung des Körpers wieder gewonnen werden.

Die zur Verrichtung der äußeren Arbeit nötige Wärme ist aber nicht die einzige, deren er zu seiner Ausdehnung bedarf. Es müssen seine Atome dabei auch in stärkere Schwingungen versetzt, ihre Gleichgewichtslagen müssen weiter von einander

entfernt werden. Die hierzu nötige Arbeit heißt innere Arbeit. Zwar wird auch ihr Wärmeäquivalent bei folgender Abkühlung des Körpers von demselben wieder ausgestrahlt oder auf sonstige Weise anderen Körpern mitgeteilt. Während der Erwärmung des Körpers geht sie aber als Wärme verloren, ohne in äußere Arbeit umgesetzt zu werden.

Hat nun aber der Körper seinen Schmelzpunkt erreicht, so müssen, um ihn flüssig zu machen, die kleinsten Teilchen desselben in ganz neue Gleichgewichtslagen gebracht werden. Die hierzu nötige Wärmemenge muß somit diejenige, welche nur die Verstärkung der Molekularbewegung, also die Ausdehnung bewirkte, um ein bedeutendes übertreffen. Dann aber können durch sie auch nicht die Moleküle des Quecksilbers im Thermometer in stärkere Schwingungen versetzt werden, eine Temperaturerhöhung findet also beim Schmelzen nicht statt. Ganz analoge Vorgänge treten beim Erwärmen einer Flüssigkeit, Verdampfen derselben und Erwärmen ihres Dampfes ein. Ist der Dampf von seiner Entstehungstemperatur hinlänglich weit entfernt, also ein Gas, so wird die sämtliche bei der Erwärmung desselben auftretende innere Arbeit fast nur zur Erhöhung der Geschwindigkeit der Gasmoleküle verwendet, da deren gegenseitige Anziehung ja ganz unmerklich geworden ist.

Außer durch Schmelzen kann ein Körper aber auch durch Auflösen in einer Flüssigkeit flüssig gemacht werden. Da hierbei seine Teilchen in dem Lösungsmittel ausgebreitet, also bewegt werden müssen, so bedarf er hierzu ebenfalls einer gewissen Wärmemenge, der Auflösungswärme. Dieselbe wird teils durch den chemischen Prozeß, der bei jeder Auflösung gleichzeitig stattfindet, hervorgebracht, teils den sich lösenden Körpern entnommen. Jede Lösung bewirkt also eine Abkühlung namentlich des stets in größerer Menge vorhandenen Lösungsmittels. Zucker in Thee oder Kaffee geworfen, Salz in einen Teller Suppe gestreut, versüßt oder würzt demnach nicht allein die Flüssigkeit, sondern kühlt sie auch ab. Hieraus erklärt es sich, daß die Salze mit wenigen Ausnahmen — das Kochsalz ist eine solche

— sich in warmem Wasser in größerer Menge lösen als in kaltem. Wie es die Theorie verlangt, wird nun umgekehrt die bei der Lösung „gebundene“ Wärmemenge wieder frei, wenn der gelöste Körper wieder aus der Lösung herausfällt, und dies geschieht demnach im allgemeinen bei folgender Abkühlung der Lösung. Bleibt dabei aber die Lösung ganz ruhig stehen, so erhält sich der Körper gelöst, scheidet sich aber dann bei der geringsten Erschütterung oder noch besser, wenn man ein kleines Kryställchen des festen Körpers in die Lösung wirft, sofort ab. So kann man eine bei erhöhter Temperatur hergestellte Lösung von Glaubersalz (Natronsulfat) auch nach ihrer Abkühlung lange stehen lassen, ohne daß sie fest wird; sie erstarrt aber sogleich, wenn man ein kleines Körnchen von Glaubersalz hineinwirft, und zwar mit solcher Geschwindigkeit, daß das Körnchen nicht Zeit findet, herabzusinken, sondern auf den neben ihm sogleich anschießenden Krystallen liegen bleibt. Gleichzeitig erwärmt sich die Lösung durch die Wirkung derjenigen Wärmemenge, welche der für ihre Verflüssigung nötigen Arbeitsmenge äquivalent ist, wie man an einem hereingestellten Thermometer leicht sehen kann.

Eine ganz analoge Erscheinung kann man beobachten, indem man eine Flüssigkeit, z. B. Wasser, welches durch längeres Auskochen von aller Luft befreit ist, abkühlt. Dasselbe bleibt noch flüssig, auch wenn sein Schmelzpunkt längst überschritten ist. Die geringste Erschütterung aber oder ein hineinfallendes Eisnädelchen bewirken sogleich das Erstarren der ganzen Masse. Die Erscheinung heißt *Überschmelzung* und sie ist der Grund, weshalb man den Nullpunkt der Thermometer nicht, wie es Reaumur wollte, in frierendem Wasser bestimmen darf, sondern hierzu schmelzendes Eis verwenden muß. Die Überschmelzung läßt sich mit Hilfe des *Gefrierthermometers* von August*)

Ernst Ferd. A., geb. 1795 in Prenzlau, war erst Prof. am Joachimsthal'schen, dann Direktor des Cölnischen Realgymnasiums in Berlin, wo er 1870 starb.

leicht nachweisen, einem Thermometer A, Fig. 121, dessen Quecksilbergefäß von einem allseitig abgeschlossenen, nur ausgekochtes Wasser enthaltenden weiten Glasgefäße B umgeben ist. Man darf den kleinen Apparat in kalter Luft bis gegen 10° abkühlen, ohne daß das Wasser friert. Schüttelt man aber alsdann denselben, so sieht man es sofort erstarren, wobei die Wassermoleküle plötzlich aus ihrer rotierenden Bewegung in die den festen Wasserteilchen zukommende übergehen müssen. Das kann nur dadurch geschehen, daß dieselbe Wärmemenge wieder frei wird, welche den Eismolekülen von der betreffenden Temperatur die rotierende Bewegung der Wasserteilchen mitteilte, also diejenige, welche die Wassermenge bis 0° erwärmte. In der That sehen wir die Temperatur beim Gefrieren bis genau auf 0° steigen. Man muß sich übrigens bei diesem Versuche hüten, daß nicht das Wasser, ohne daß es geschüttelt wird, friert, weil sonst das Glasgefäß unfehlbar springt.

Fig. 121.

Die Gefrierpunkte einer Flüssigkeit in einer Lösung liegen tiefer als die der Flüssigkeit allein, da beim Gefrieren noch die Molekularanziehung des Salzes und Wassers überwunden und hierzu Wärme in Arbeit verwandelt werden muß. So bleibt eine Salzlösung, z. B. Seewasser, bei 0° noch flüssig, ebenso frieren Pflanzensäfte, die meist Zucker oder Salze gelöst enthalten, bei einigen Graden unter 0°. Je konzentrierter die Lösung ist, desto tiefer liegt natürlich der Gefrierpunkt. Bringt man nun Salze mit Eis von 0° in Berührung, so ist die Anziehung der Salzmoleküle zu den Wassermolekülen so groß, daß das Salz das Eis flüssig macht und sich in dem nunmehr entstehenden Wasser auflöst. Da aber hierzu eine beträchtliche innere Arbeit nötig ist, einmal um das Wasser flüssig zu machen und sodann um das Salz in dem Wasser auszubreiten, so können beide Vorgänge

nur langsam vor sich gehen. Die für diese Arbeit nötige Wärme muß nämlich aus der Umgebung genommen werden, die sich lösende Masse selbst aber kühlt sich auf die Temperatur ab, bei welcher das Wasser aus ihr frieren würde. Die niedrigste Temperatur, welche beim Auflösen eines Salzes in Eis erhalten werden kann, ist demnach diejenige, bei welcher Wasser aus einer möglichst konzentrierten Lösung des Salzes friert. Man bekommt sie, wenn man soviel Salz und Eis mischt, daß die entstehende Lösung gerade konzentriert wird. Bei einer Mischung von Kochsalz und Eis hat man also 3 Teile Eis auf 1 Teil Kochsalz zu nehmen. Die niedrigste Temperatur, die man dadurch erhalten kann, ist — 21° C. Derartige Kältemischungen wendet man zur Herstellung des künstlichen Eises an. Fahrenheit bestimmte, wie wir sahen, seinen Nullpunkt mittelst einer Lösung aus Salz und Salmiak.

Es ist nun lediglich eine Folgerung aus unserer Theorie, daß die zur Verflüssigung von Eis nötige Arbeit auch auf andere Weise, z. B. durch Druck verrichtet werden kann. Dies bewies Mousson*), indem er in einem hohlen Stahlcylinder mit starken Wänden Wasser frieren ließ, in welchem sich ein Kupferstäbchen befand. Darauf wurde der Cylinder umgekehrt, so daß das Stäbchen nach oben kam, und in einer Kältemischung, die die Temperatur des Eises auf — 18° hielt, mittelst einer Schraubenpresse einem Drucke von etwa 13000 Atmosphären (13000 Kg auf 1 Quadratcentimeter) ausgesetzt. Nach dem Öffnen fand man in dem unteren Teile des heraustretenden Eisstückes den Kupferstab. Das Wasser mußte also unter dem enormen Drucke bei — 18° flüssig gewesen sein. Ebenso fand Thomson**), daß man den Schmelzpunkt von Wasser durch den Druck von 16 Atmosphären um 0,13° erniedrigen kann.

In viel höherem Maße als der Schmelzpunkt hängt der

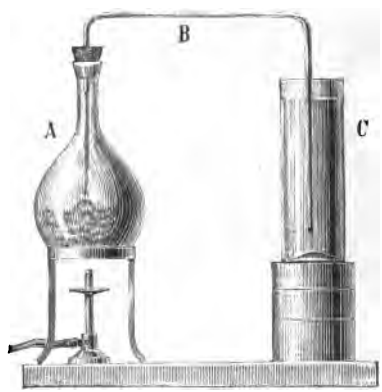
*) Jos. Rud. Albert M., geb. 1805 in Solothurn, Prof. in Zürich.

**) Sir William Th., geb. 1814 in Belfast, ist seit 1846 Professor in Glasgow.

Siedepunkt der Körper von dem Drucke ab, unter dem sie stehen. Auf einer Flüssigkeit, welche in einem nicht luftdicht geschlossenen Gefäße enthalten ist, lastet, wie auf einem jeden an der Erdoberfläche befindlichen Körper, der Luftdruck mit einer mittleren Kraft von 1 Kg pro Quadratcentimeter. Beim Sieden dieser Flüssigkeit ist also außer der inneren Arbeit stets dieser Druck unter Ausführung von äußerer Arbeit zu überwinden; für beide Arbeiten muß die zugeführte Wärme aufkommen. Ein höherer Druck erfordert mehr Arbeit, also auch mehr Wärme, und es muß somit der Siedepunkt mit dem Drucke steigen. Die mit 100° C bezeichnete Siedetemperatur des Wassers gilt nur für einen Barometerstand von 760 mm, und deshalb muß bei Bestimmung des Siedepunktes der Thermometer der Luftdruck berücksichtigt werden. Bei geringerem Drucke, also namentlich auch im luftverdünnten Raume, siedet das Wasser bei einer viel niedrigeren Temperatur als 100°. Dies zeigt unter anderen der folgende Versuch, als dessen Resultat man die Lösung der Aufgabe bezeichnen könnte, durch Zufügen von kaltem Wasser zu warmem dieses zum Sieden zu bringen. Durch den Stopfen im Halse eines Kochkolbens A, Fig. 122, der etwas Wasser enthält, ist ein zweimal rechtwinklig gebogenes Glasrohr B gesteckt, so daß das in den Kolben reichende Ende ganz nahe unter dem Stopfen, das andere in der freien Luft endet. Mittelst eines untergesetzten Bunsen'schen Brenners bringt man nun das Wasser in A ins Sieden und läßt es darin eine Zeit lang verharren. Löscht man dann die Flamme des Brenners aus, so hört das Sieden und mit ihm der während desselben aus dem offenen Ende von B austretende Dampfstrahl auf. Setzt man in diesem Augenblicke unter die Öffnung des Rohres ein Gefäß C mit möglichst kaltem Wasser, und sorgt dafür, daß dieses über die Rohröffnung tritt, so steigt es in B langsam empor. Der aufsteigende Wasserdampf hat nämlich alle Luft, oder doch den größten Teil derselben aus A verdrängt; A enthält also nur noch Dampf, der sich bei der nun folgenden Abkühlung niederschlägt.

Dadurch treibt aber der auf der Oberfläche des kalten Wassers lastende Luftdruck dasselbe durch C und B nach A. Sobald nun der kalte Wasserstrahl in den mit erhitztem Dampf gefüllten Raum eintritt, wird der Dampf rasch verdichtet, es entsteht ein luftleerer Raum in A, und da das durch B nachdringende Wasser ihn nicht rasch genug ausfüllen kann, so beginnt das Wasser in A sehr heftig von neuem zu sieden. Denn nun liegt seine Temperatur weit über derjenigen des Siedepunktes, der dem Druck im Gefäße entspricht. In anderer Form kann dieser Versuch nach Franklins*) Vorgang angestellt werden. Dazu läßt man zunächst Wasser in einem genügend großen Kolben recht lange sieden, nimmt dann die Flasche vom Feuer, stopft sie zu und kehrt sie um. Gießt man nun Wasser auf den Boden der Flasche, so tritt ein lebhaftes Sieden ein. Der erste, der diesen Versuch anstellte, war übrigens Papin, welcher ein zum Teil mit Wasser oder Alkohol gefülltes Gefäß durch Auspumpen luftleer machte, dann mit einem Stopfen verschloß und nun in kaltes Wasser stellte. Auch dann trat heftiges Sieden auf. In allen diesen Fällen wird der Siedepunkt der Flüssigkeit durch starke Verminderung des Druckes bedeutend erniedrigt.

Fig. 122.

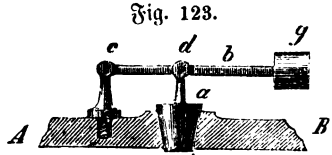


Umgekehrt steigt er mit wachsendem Drucke. Am einfachsten bringt man Wasser unter hohem Drucke zum Sieden, wenn man

*) Benjamin F., geb. 1706 zu Boston, war erst Buchdrucker in Philadelphia, später Generalpostmeister; dieses Postens wieder beraubt wirkte er in Paris für die Unabhängigkeit seines Vaterlandes. Er starb als Präsident des Congresses für Pennsylvanien 1790 in Philadelphia.

es in einem dampfdicht geschlossenen eisernen Gefäße erhitzt, dessen Deckel durch Schrauben festgehalten wird. Der sich entwickelnde Dampf kann nicht entweichen und übt so einen Druck auf die Gefäßwände und das Wasser aus, den man beliebig steigern kann, wenn man nur genügend erwärmt. Auch diesen Versuch hat zuerst Papin angestellt und das Gefäß heißt deshalb nach ihm der Papin'sche Topf oder der Digestor. Der Gefahr der Explosion, der derselbe bei zu starkem Erhitzen ausgesetzt ist, suchte Papin dadurch vorzubeugen, daß er an dem Deckel des Gefäßes ein Sicherheitsventil anbrachte. Ein solches besteht aus einem metallenen kegelförmigen Stöpsel a, Fig. 123, der in eine Vertiefung des Deckels A B vorsichtig eingeschliffen ist. Mittelst eines Stiftes d greift er an einen Hebel b, dessen eines Ende c an einem Säulchen drehbar befestigt ist, während sein anderes Ende ein Gewicht g trägt. Nach dem für solche Hebel geltenden Gesetze drückt dann g mit einer Kraft auf den Stempel, die sovielmal sein Gewicht an Größe übertrifft, als die Entfernung des Stängelchens d von c in dem Abstand des Gewichtes von c enthalten ist. Man versprach sich übrigens zur Zeit seiner Erfindung sehr viel größeren Nutzen von dem Digestor, als er nachher gewährte. Da man beobachtet hatte, daß bei der viel höheren Siedetemperatur, die man in ihm erreichen konnte, aus bereits ausgekochten Knochen noch eine Menge organischer Bestandteile derselben in Lösung gingen, so hoffte man solche namentlich für Armensuppen verwenden zu können, wie denn Papin, als er nach Kassel übergesiedelt war, alle Knochen aus der Hofküche des Landgrafen von Hessen zu solchem Zwecke erhielt. Indessen fand man bald, daß die aus den Knochen extrahierten Stoffe einen nur geringen Nährwert haben, es sind Leimsubstanzen, die nicht einmal schmackhaft sind. Deshalb kam man bald davon ab und der Digestor geriet in unverdiente Ver-

Fig. 123.



gessenheit, aus der er erst neuerdings hervorgezogen und als Dampfkochtopf rehabilitiert wurde, nachdem man eingesehen hatte, daß er einmal den Vorteil der besseren Ausnutzung des Brennmaterials und sodann den des vollständigeren Erweichens der Nahrungsmittel beim Kochen und Braten bietet. Der unter hohem Druck entwickelte Dampf durchdringt die in ihm befindlichen Stoffe so vollständig, wie dies überhaupt möglich ist, und bringt seine Temperatur so bis in ihre innersten Teile. Von der größten Wichtigkeit wird der Dampfkochtopf aber auf hohen Bergen. Da gewisse Bestandteile unserer Speisen erst bei einer Temperatur von etwa 100° erweichen oder gerinnen und dadurch verdaulich werden, die Siedetemperatur des Wassers aber bei einem Barometerstand von 700 mm zwischen 97 und 98°, bei einem solchen von 600 mm zwischen 93 und 94° ꝛc. liegt, solche Barometerstände auf hohen Bergen aber nicht selten sind, so könnten daselbst die Speisen nicht gar gekocht werden, wenn man nicht im Digestor ein bequemes Mittel hätte, auch dort jede beliebige Siedetemperatur zu erreichen.

Das Sieden einer Flüssigkeit erfolgt nun stets in der atmosphärischen Luft, es ist deshalb von Wichtigkeit zu untersuchen, ob dieser nicht ein Einfluß dabei zukommt, es erfolgt ferner in Gefäßen von verschiedenem Material, auch ist selten das siedende Wasser ganz rein, durch beide Umstände kann möglichenfalls auch die Siedetemperatur beeinflußt werden. Ob dies der Fall ist, haben wir zunächst festzustellen.

Um diesen Zweck zu erreichen, fassen wir das Verdampfen einer Flüssigkeit im luftleeren Raume näher ins Auge. Bringt man in verschiedene Barometer, die in demselben Queckſilbergefäß stehen, Flüssigkeiten, und zwar am besten solche, deren Siedepunkte möglichst weit von einander entfernt liegen, z. B. Äther, welcher bei 35°, Alkohol, der bei 78° und Wasser, welches bei 100° in der Luft siedet, wenn deren Druck 760 mm beträgt, so drängen diese Flüssigkeiten lebhaft Dampf entwickelnd das Queckſilber herab, bis dasselbe in allen drei einen festen Stand annimmt, und zwar stellt sich im Ätherbarometer, wie wir uns kurz aus-

drücken wollen, das Queckſilber am niedrigſten, weniger niedrig im Alkoholbarometer und noch weniger im Waſſerbarometer. Der Luftdruck iſt bei der kurzen hierzu nötigen Zeit unverändert geblieben, es muß alſo, da das Gewicht der kleinen Flüſſigkeitsmenge nicht in Betracht kommt, ein Teil desſelben von dem entwickelten Dampf getragen werden, nämlich derjenige Teil, welcher dem Gewicht der Queckſilberſäule im gewöhnlichen Barometer weniger demjenigen im Flüſſigkeitsbarometer gleich iſt. Der Dampf muß alſo imſtande ſein, einen gewiſſen Druck auszuüben, welcher Druck den Namen der Spannkraft des Dampfes trägt.

Hebt man nun eines der Barometer aus dem Gefäße empor, ſo jedoch, daß ſein unteres Ende nicht aus dem Queckſilber herauskommt, ſo ändert ſich der Druck nicht, da der nunmehr vergrößerte Dampfraum von ſich ſofort weiter entwickelndem Dampfe immer wieder angefüllt wird. Senkt man umgekehrt das Rohr herab, ſo ſchlägt ſich ſoviel Dampf nieder, daß auch jetzt der Druck der nämliche bleibt. Dagegen ergiebt ſich, daß der Druck ſich ändert, ſowie die Temperatur eine andere wird, und da wegen des Niederſchlages des Dampfes, welcher eintritt, ſowie man den Verdampfungsraum verkleinert, die Spannkraft einen größeren Wert nie erreichen kann, ſo iſt der ſo beobachtete Druck das Maximum der Spannkraft für die betreffende Temperatur. So lange Flüſſigkeit im Verdampfungsraume vorhanden iſt, kann aber die Spannkraft auch nicht kleiner werden; nur wenn die Flüſſigkeit vollſtändig verdampft iſt, iſt dies möglich. Der Dampf verhält ſich dann wie ein Gas und folgt dem Geſetz von Boyle*), nach welchem ſein Druck in demſelben Maße abnimmt, als ſich der Raum, in welchem er ſich befindet, vergrößert. Aus dieſem Grunde hat die ſo beobachtete Spannkraft wohl ein Maximum, aber nicht ein Minimum.

Um nun den Einfluß der Luft auf dies Verdampfen der

*) Robert B., geb. 1627 in Lismore in Irland, lebte als reicher Privatmann nach mehreren Reiſen als Präſident der Royal Society in London, wo er 1691 ſtarb.

Flüssigkeiten zu studieren, bringt man in den Verdampfungsraum über den Flüssigkeiten zugleich etwas Luft und richtet nach dem Vorgange Gay-Lussacs den Apparat so ein, daß man die Spannkraft der Luft und des Dampfes zunächst gesondert und dann diejenige des Gemisches von beiden beobachten kann. Die letztere ergiebt sich dann einfach als Summe der beiden andern. Die Luft kann somit keinen Einfluß auf das Verdampfen ausüben, das Maximum der Spannkraft ist das nämliche im luftleeren, wie im lufterfüllten Raume. Das ist aber nicht anders möglich, als wenn sich die Dampfteilchen in die Zwischenräume zwischen den Luftteilchen begeben. Der Einfluß, welchen bewegte Luft auf die Verdampfung ausübt, steht hiermit nicht im Widerspruch. Er hat darin seinen Grund, daß die Luft fortwährend die über der Oberfläche des Wassers gebildeten Dämpfe wegnimmt und dadurch den Raum über derselben immer wieder von neuem fähig macht, solche aufzunehmen.

Ist somit der über einer siedenden Oberfläche befindlichen Luft, wenn man von dem Drucke, mit welchem sie auf jener lastet, absieht, keine Einwirkung auf die Dampfbildung zuzuschreiben, so gilt dasselbe keineswegs von der Beschaffenheit der Gefäßwände. Namentlich mit siedendem Wasser sind hierüber eingehende Versuche angestellt. Läßt man das Sieden in einem auf gewöhnliche Weise gereinigten Glasgefäß vor sich gehen, so beobachtet man gemeiniglich eine um 2° höhere Siedetemperatur, als dem herrschenden Drucke entspricht. Doch wird die Siedetemperatur um ein Beträchtliches erhöht, wenn man das Gefäß erst mit konzentrierter Schwefelsäure oder Kalilauge reinigt. Man nennt diese Erhöhung einen Siedeverzug und man kann es dahin bringen, daß derselbe bis zu 200° steigt. Auch Beimischungen fremder Körper erhöhen den Siedepunkt des Wassers; so sieden Salzlösungen stets bei höherer Temperatur als reines Wasser, und die Höhe dieser Temperatur hängt von dem Salzgehalte der Lösung ab. Beide Erscheinungen erklären sich leicht, wenn man den Vorgang des Siedens einer eingehenden

Betrachtung unterwirft. Die Verwandlung des Wassers in Dampf geschieht an der Stelle der Gefäßwand, welche am stärksten erhitzt wird, also in der Wasserschicht, welche sich der Wärmequelle am nächsten befindet. Soll sich nun hier eine Dampfblase bilden, so muß ihre Spannkraft zunächst imstande sein, das Gewicht des über ihr befindlichen Wassers und des auf diesem lastenden Luftdruckes zu heben. Dann aber muß die Spannkraft des entstehenden Dampfes auch die Flüssigkeit vom Gefäße trennen, indem sie die Molekularanziehung beider überwindet. Diese ist nun in einem Glasgefäße um so größer, je reiner das Glas ist, kräftigere Reinigungsmittel als Schwefelsäure und Kalilauge besitzt man aber nicht. Soll Dampf nun in einem Glasgefäß entstehen, so muß zunächst seine Siedetemperatur höher sein als diejenige, welche dem herrschenden Luftdruck entsprechen würde. Der Dampf, der bei dieser Temperatur gebildet ist, kann aber noch nicht emporsteigen. Denn einmal kühlt er sich in der noch zu wenig heißen Flüssigkeit zu rasch ab, dann aber hat seine Spannkraft noch nicht die Stärke erreicht, welche nötig ist, um die Flüssigkeitsteilchen auseinander zu reißen. Die entstehenden Dampfblasen werden infolge davon sogleich nach ihrem Auftreten wieder zusammengedrückt und das dadurch verursachte Geräusch ist das Singen, welches das Sieden ankündigt. Erst wenn die Temperatur noch weiter gestiegen ist, tritt das wallende Sieden ein, und da die Kraft, mit der die Teilchen einer Salzlösung zusammengehalten werden, größer ist als diejenige, welche die Wasserteilchen aneinander haften läßt, so muß die Temperatur von Wasserdampf, welcher aus Salzlösungen aufsteigen soll, höher sein als die von Dampf, welcher sich aus reinem Wasser entwickelt. In allen diesen Fällen muß also der Dampf überhitzt sein, weil seine Spannkraft eine größere Arbeit, als die Überwindung des Luftdruckes zu verrichten hat. Erst etwa 1 bis 2 cm oberhalb der Flüssigkeit nimmt er die Temperatur an, welche einer dem Luftdruck gleichen Spannkraft entspricht, und hier muß also das Gefäß eines Thermometers

aufgestellt werden, dessen Siedepunkt man bestimmen will, wovon bereits die Rede war.

Die während des Siedens der Flüssigkeit zugeführte Wärme muß dazu verwendet werden, die Bewegung der Flüssigkeitsmoleküle in diejenige der Gasteilchen umzuwandeln. Obwohl dabei die Wege, die sie zurücklegen, beträchtlich wachsen, so bleibt die absolute Größe dieser Wege doch noch sehr gering; für Wasserdampf hat man sie annähernd zu 24 zehnmilliontel Millimeter bestimmt. Hört dabei die gegenseitige Anziehung der Moleküle ganz auf, so wird der Dampf zum Gas und hierin liegt die Rechtfertigung dafür, einen Dampf als ein Gas anzusehen, dessen Siedetemperatur viel tiefer liegt als die Temperatur, bei welcher wir es beobachten. Ist nun ein Gas in einem Gefäße eingeschlossen, so fliegen seine Teilchen wie tausende von kleinen Geschossen gegen die Wand des Gefäßes. Verkleinert man dann den Raum, welcher das Gas einschließt, so wächst in demselben Verhältnis die Anzahl der auf der Raumeinheit befindlichen Atome, also auch die Zahl der auf die Flächeneinheit ausgeübten Stöße. In demselben Verhältnis wächst aber der auf die Wand ausgeübte Druck. Diese Betrachtung ergiebt mithin das oben erwähnte Boyle'sche Gesetz, daß in demselben Verhältnis der Druck eines Gases abnimmt, in dem sein Volumen wächst und umgekehrt, vorausgesetzt, daß seine Temperatur ungeändert bleibt. Ist dies jedoch nicht der Fall, so wird eine Erhöhung der Temperatur die Stärke der Bewegung ändern und diese wird, bei nunmehr gleichbleibendem Volumen, ebenfalls den Druck vermehren. Demnach wächst derselbe in dem Verhältnis, in welchem die absoluten Temperaturen zunehmen, und so erhält man das ebenfalls bereits erwähnte Gesetz von Gay-Lussac, daß sich bei ungeändertem Volumen die Drucke wie die absoluten Temperaturen verhalten. Nach Maxwell*) enthält 1 Kubikcentimeter Gas bei gewöhnlicher Dichtigkeit 19 Millionen Billionen Moleküle; bei einer Ver-

*) James Clerk M., geb. 1831 in Edinburgh, wurde 1856 Prof. in Aberdeen, 1860 in Cambridge, wo er 1882 starb.

dünnung desselben, wie sie im Radiometer erreicht wird, ist ihre Zahl immer noch beträchtlich, ihre mittlere Weglänge ist unter diesen Umständen auf etwa 2 mm berechnet.

Um nun einen Dampf wieder zur Flüssigkeit zu verdichten, hat man ihn nur genügend abzukühlen, oder genügend zusammenzupressen, oder beides zugleich zu thun. Daß sich die Gase ebenso verhalten, wurde 1823 von Faraday*) bewiesen, welcher, durch Zufall darauf geführt, durch hohen Druck bei starker Temperaturerniedrigung eine Anzahl Körper flüssig darstellte, die man bis dahin nur als Gase gekannt hatte. Auch mit Kohlensäure stellte Faraday damals zu gleichem Zwecke Versuche an, die aber nicht zur Verdichtung des Gases führten. Das gelang erst 1835 Thilorier vollständig, so vollständig, daß er unter Benutzung einer Temperatur von gegen — 100°, die er durch Verdampfen der Kohlensäure selbst herstellte, sogar feste Kohlensäure erhielt. Dieselbe löst sich nicht in Wasser, wohl aber in Äther, und mittelst dieser Lösung läßt sich eine Kältemischung herstellen, die eine Temperatur von — 70° leicht erreicht. Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff aber trotzten allen Versuchen, sie zu Flüssigkeiten zu verdichten. Man erreichte nur, daß sie bedeutend geringere Volumina zeigten, als sie nach dem Boyle'schen Gesetz hätten zeigen müssen, nachdem bei möglichster Temperaturerniedrigung der Druck auf 3600 Atmosphären gesteigert war. Weitere Versuche mit der Kohlensäure lehrten aber, daß die Kohäsion von Flüssigkeiten, welche unter erhöhtem Drucke erhitzt werden, bis zu einem gewissen Punkte abnimmt, daß dann dieselben jedoch ganz unabhängig von Druck und Temperatur verdampfen. Diesen Punkt hat man kritische Temperatur oder absoluten Siedepunkt genannt. Aus der Thatsache der von Druck und Temperatur unabhängigen Verdampfung muß man dann den Schluß ziehn, den das Experiment auch vollständig

*) Michael F., geb. 1791 in Newington bei London, war Prof. daselbst. Er starb 1867 in Hampton Court.

bestätigte, daß ein jedes Gas nur bei Temperaturen, welche unter seiner kritischen liegen, zu einer Flüssigkeit verdichtet werden kann, bei darüber liegenden Temperaturen dagegen auch eine Grenze der Verdichtbarkeit besitzt, aber auch dann noch, wenn es diese Grenze erreicht hat, immer ein Gas bleibt. Man hatte demnach allen Grund anzunehmen, daß die kritische Temperatur des Sauerstoffs, Stickstoffs und Wasserstoffs eine sehr niedrige sei und daß ihre Verdichtung nur unter gleichzeitig sehr weit getriebener Abkühlung gelingen könnte. Daß dies sich in der That so verhält, bewies Pictet, indem er 1877 Sauerstoff und Wasserstoff dadurch wirklich flüssig machte, daß er ihre Temperatur durch verdampfende Kohlensäure auf — 140°, den Druck aber auf 500 Atmosphären brachte. Die aus dem hierzu dienenden Apparate strömenden Gase zeigten deutlich Nebelbildung. Freilich hatte ihre Verdunstungskälte die Temperatur noch bedeutend erniedrigt. Die kritischen Temperaturen derjenigen Körper, welche wir in flüssiger Form zu sehen gewohnt sind, liegen verhältnismäßig hoch, die des Wassers z. B. bei 411°, die des Alkohol bei 258°, die des Äther bei 187°, und daraus erklärt es sich, daß dies eigentümliche Verhalten der Gase so lange unbekannt geblieben ist.

Die Verdunstungskälte rasch verdampfender Körper reicht nun vollständig aus, um Wasser gefrieren zu lassen. Darauf beruht der größte Teil der Eismaschinen. Verdampft man in einem Reagenzröhrchen Schwefeläther, indem man Luft mittelst eines Blasebalges hindurch treibt, während das Röhrchen auf einem einige Tropfen Wasser enthaltenden Uhrgläschen steht, so gefriert das Wasser im Uhrgläschen. Auch im Großen wendet man den Äther zu demselben Zwecke an, indem man ihn in einem Gefäße verdampfen läßt, und durch die so entstehende niedrige Temperatur Wasser zum Frieren bringt, welches in einem das Verdampfungsgefäß umschließenden Gefäße enthalten ist. In einem zweiten Gefäße, das einfach durch Wasser gekühlt wird und mit dem Verdampfungsgefäß durch Röhren in Verbindung steht,

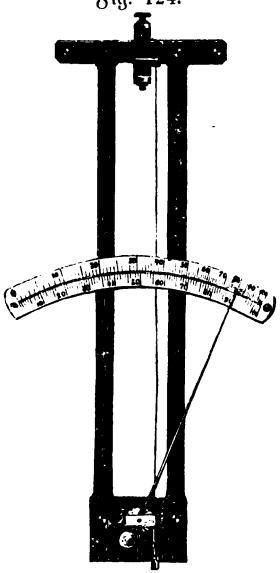
schlägt man dann den Ätherdampf wieder nieder. Kräftiger noch als Äther wirken Ammoniakgas und schweflige Säure, die erst flüssig gemacht und dann in einen Raum verdampft werden, aus dem man die Luft herausgepumpt hat. Bei Ammoniak ist dies nicht einmal nötig, da dieses Gas von kaltem Wasser so begierig gelöst wird, daß dadurch der Raum, den es einnahm, immer wieder luftleer und so von neuem geschickt wird, Gas aufzunehmen. Dadurch wird die Geschwindigkeit des Verdampfens und mit ihm die Verdunstungskälte ungemein gesteigert. Durch Erhitzen treibt man dann das Ammoniak aus dem Wasser wieder aus. Man hat also nur zwei eiserne Gefäße luftdicht mit einander zu verbinden, von denen das eine das in Wasser gelöste Ammoniak enthält, und dieses abwechselnd zu erhitzen und wieder abzukühlen. Versieht man das andere in der Mitte mit einem Hohlraum, in den Wasser gegossen werden kann, so friert dies, während man das erste Gefäß wieder abkühlt. Auch dadurch, daß man Luft stark komprimiert, abkühlt und dann sich ausdehnen läßt, während sich das Kompressionsgefäß in einem mit Wasser gefüllten weiteren Gefäß befindet, kann man Eis erzeugen. Läßt man diese Luft durch ein mit Wasser gefülltes Becken aufsteigen, so verwandelt sich dasselbe in Eis und auf diese Weise stellt man künstliche Eisbahnen (Glaciarien) her. Durch Glycerin, welches abgekühlt in Röhren geleitet wird, kann man, wenn nötig, die durch die Eismaschinen erzeugte Kälte an einem andern Orte wirksam werden lassen.

Da die Luft stets mit weit ausgebreiteten Wasserflächen in Berührung ist, so enthält sie zu allen Zeiten Wasserdampf, dessen Spannkraft einen Teil der Quecksilbersäule im Barometer im Gleichgewichte hält. Will man also den Druck finden, welchen zu einer gewissen Zeit die Luft allein ausübt, so muß man die Spannkraft des in ihr enthaltenen Wasserdampfes bestimmen können. Die hierzu geeigneten Instrumente, welche man Hygrometer nennt, beruhen auf den Veränderungen, welche gewisse organische Fasern durch den Einfluß

der wachsenden oder abnehmenden Luftfeuchtigkeit erleiden, oder auf der direkten Beobachtung der in der Luft enthaltenen Menge Wasserdampf. Je größer dieselbe ist, desto stärker ist der Druck, den der Dampf ausübt, und somit auch der, den er auszuhalten hat, desto höher liegt mithin die Temperatur, bei der seine Spannkraft ihr Maximum erreicht. Kühlt sich demnach die Luft ab, so wird sie rasch auf die Temperatur dieses Maximums kommen. Da alsdann aber der Wasserdampf sich niederschlagen muß, so führt diese Temperatur den Namen des Taupunktes. Die Bequemlichkeit, mit welcher man denselben beobachten kann, und die Leichtigkeit, mit der man daraus die in einem bestimmten Luftvolumen (z. B. ein Kubikmeter) vorhandene Menge Wasserdampf berechnet, hat der Bestimmung desselben eine besondere Wichtigkeit verliehen. Auch ist seine Kenntnis notwendig, wenn man in einem gegebenen Moment über die Wahrscheinlichkeit, ob Niederschläge, Nachtfröste ꝛc. eintreten werden, sich ein Urteil bilden will. Am einfachsten bestimmt man ihn, indem man in ein silbernes, durch darin verdampfenden Äther stark abgekühltes Gefäß ein Thermometer stellt und den Stand desselben gerade in dem Moment ablieſt, in welchem sich Wasser auf dem Gefäße niederschlägt. Auch aus dem Temperaturunterschiede zweier Thermometer kann man ihn finden, von denen das eine mittelst eines um sein Gefäß gelegten in Wasser tauchenden Läppchens von dünnem Zeug, aus dem das Wasser in die Luft verdampft, stets feucht erhalten wird. Die Behandlung dieser Apparate, deren letzterer den Namen des Psychrometers führt, hat aber nicht die Bequemlichkeit solcher Instrumente, welche der Laie gewohnt ist zu beobachten, des Thermometers und Barometers z. B. Man hat deshalb auch Hygrometer konstruiert, welche in jedem Augenblick die gerade in der Luft vorhandene Feuchtigkeitsmenge angeben und zwar in Prozenten derjenigen, welche die Luft enthalten würde, wenn sie ganz mit Wasserdampf gesättigt wäre. Dazu bieten die oben erwähnten organischen Fasern das beste Mittel, die je nach dem Wassergehalt der Luft

ihre Länge ändern. Namentlich werden die menschlichen Haare, wie jeder leicht an sich selbst beobachten kann, länger, wenn die Luft feucht ist, und zwar geschieht dies mit großer Regelmäßigkeit, wenn sie vollständig entfettet werden. Man befestigt deshalb ein solches Haar mit einem Ende an einer Schraube a, Fig. 124, während das andere so an ein Röllchen angreift, daß es dieses bei jeder Änderung seiner Länge dreht. Auf der Achse des Röllchens ist ein leichter Zeiger befestigt, dessen Übergewicht ein kleines Gegengewicht aufhebt und dessen Spitze auf einer Skala spielt. Diese erlaubt den Feuchtigkeitsgehalt in Prozenten direkt abzulesen. An dem von Hermann und Pfister in Bern konstruierten Hygrometer, welches die Figur darstellt, befindet sich diese Skala am oberen Rande des Gradbogens, der untere Rand trägt aber eine zweite Skala, die von dem Erfinder des Apparates de Saussure*) herrührt und welche den Kreisbogen einfach in 100 gleiche Teile teilt. Sie wurde von Gay-Lussac in die obere Prozentskala umgerechnet. Nicht so einfach zu übersehen wie der soeben beschriebene Apparat, aber an Genauigkeit mit ihm wetteifernd, ist das Hygrometer von Klinkerfues**), bei dem zwei am einen Ende befestigte Haare gegen einander wirkend die Achse eines Zeigers drehen. Der diesem Instrumente beigegebene, mit Teilungen versehene Schieber macht es besonders

Fig. 124.



*) Horace Bénedicte de S., geb. 1740 bei Genf, war erst Prof., dann Mitglied des Rates daselbst, machte später viele wissenschaftliche Reisen. Er starb 1799 in Genf.

**) Ernst Friedr. Wilh. Kl., geb. 1827 in Hofgeismar, Prof. in Göttingen.

geeignet, aus dem in Prozenten gefundenen Feuchtigkeitsgehalt der Luft den augenblicklichen Taupunkt zu bestimmen.

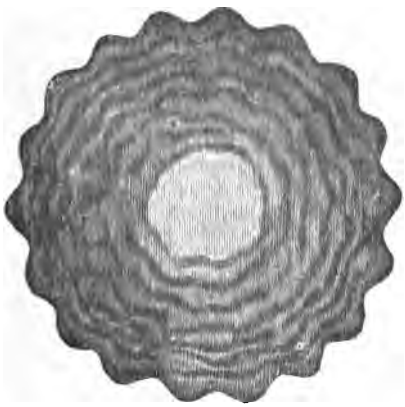
Wünscht man nur zu wissen, ob die Feuchtigkeit der Luft zu- oder abnimmt, so reichen allerdings viel ungenauere, aber auch einfachere Hygroskope aus. Ein sehr verbreitetes ist aus einer gedrehten Darmsaite hergestellt, die sich bei ändernder Luftfeuchtigkeit auf- und zudreht, indem ihre Fasern sich verlängern oder verkürzen. Sie trägt einen Stab, auf dessen einem Ende eine Frau mit einem Sonnenschirm, auf dem andern ein Mann mit einem Regenschirm angebracht sind, die abwechselnd aus zwei Thüren heraustreten und sich wieder hinein zurückziehen können. Das Erscheinen der Frau deutet trockene, das des Mannes feuchte Luft an. Noch einfacher ist ein Hygroskop, welches man sich selbst aus einem Samenkorn von Erodium cicutarium (Reiherschnabel) verfertigen kann. Das Samenkorn besitzt eine lange Granne, die korkzieherartig gewunden senkrecht aufsteigt und dann rechtwinklig abbiegt. Mit wachsender Feuchtigkeit dreht sich dieser Korkzieher auf und bohrt das Samenkorn, indem der schwanzartige Teil der Granne sich dagegenstemmt, in die Erde, während es bei folgendem Austrocknen diesen Teil der Granne zu neuem Stemmen nachschleppt. So bringt es lediglich durch die Wirkung der Feuchtigkeit in die Erde ein. Steckt man nun das Samenkorn in einen Kork und bringt unter der Granne ein mit einer Kreisteilung versehenes Blatt Papier an, so ergiebt das Hin- und Herbewegen der Grannenspitze die Zu- oder Abnahme der Luftfeuchtigkeit.

Nicht minder interessante Erscheinungen, wie langsam sich in Dampf verwandelnde Flüssigkeiten, zeigen solche, welche man dadurch, daß man einzelne Teile ihrer Begrenzungsfläche erhitzt, einem äußerst rapiden Verdampfen aussetzt. Bringt man eine Flüssigkeit auf einen heißen, die Wärme leicht an sie abgebenden Körper, z. B. Wasser auf eine mäßig erhitzte Metallplatte, so tritt plötzliches Sieden ein, indem das Wasser unter lautem Zischen und heftigem Blasenwerfen verdampft. Je heißer die Platte ist, um so heftiger,

LIBRARY OF THE

sollte man meinen, müsse das Sieden vor sich gehen. Doch ist dies durchaus nicht der Fall. Vielmehr rollen, wenn die Platte sehr heiß ist, die darauf fallenden Tropfen hin und her, bis sie endlich verschwinden oder herabgeworfen werden. Diese Erscheinung war längst bekannt, ebenso die auf demselben Grund beruhende, daß wenn man unter einen Hammer in demselben Augenblicke Wasser spritzt, in welchem dieser auf glühendes Eisen niederfällt, ein lauter flintenschußähnlicher Knall entsteht, doch aber gelang die Erklärung erst, als man einen von Leidenfrost*) 1756 angestellten Versuch richtig zu verstehen lernte. Denselben pflegt man jetzt in folgender Form vorzuführen. Man erhitzt eine kleine Metallschale, am besten von Silber, über einer Flamme, so daß sie rotglühend wird, und bringt vorsichtig einen Tropfen Wasser darauf; dieser behält dann seine Kugelform und bleibt unter taumelnden Bewegungen, welche ihn von oben gesehen in der Form erscheinen lassen, die Fig. 125 darstellt, während er langsam kleiner wird. Nimmt man die Lampe unter der Schale weg, so hält diese Bewegung noch kurze Zeit an, bis der Tropfen unter explosivem Aufzischen und lebhafter Nebelbildung entweder ganz oder zum Teil verdampft. Kehrt man die Schale um und wiederholt den Versuch auf der erhabenen Seite derselben, indem man hinter sie ein Licht aufstellt, so bemerkt man, daß es mög-

Fig. 125.



*) Joh. Gottlob L., geb. 1715 in Ortenberg, Grafschaft Stolberg, war erst preußischer Feldarzt, seit 1743 Prof. in Duisburg, wo er 1794 starb.

lich ist, zwischen der Schale und dem Tropfen hindurchzusehen. Beide sind also nicht mit einander in Berührung, der Tropfen schwebt über der Schale und dies ist nur dadurch möglich, daß er von einer Dampfschicht getragen wird, die jedesmal da entsteht, wo er mit der heißen Metallfläche in Berührung kommt. Dort tritt sofort eine so lebhafte Verdampfung und Erhitzung ein, daß die Moleküle in eine heftig schwingende Bewegung geraten und so die Wasserteilchen, die auf die Schale herabfallen wollen, immer wieder emporschleudern. Das dauert so lange, als dem Dampf genügende Wärme zugeführt wird. Zugleich verhindert seine geringe Leitungsfähigkeit, daß die Wärme der Platte zu dem Wasser gelangen kann. Kühlt sich nun aber die Platte ab, so kommt ein Moment, wo die Spannkraft des Dampfes nicht mehr imstande ist, das auf ihm lastende Gewicht des Wassers zu tragen, er wird zusammengedrückt und gleichzeitig kommt nun der Tropfen seiner ganzen unteren Fläche nach mit der noch heißen Schale in Berührung. Er kann nun momentan eine große Wärmemenge aufnehmen und ein plötzliches Sieden ist die Folge.

Wenn die Spannkraft des Dampfes in dem Leidenfrost'schen Versuch eine mechanische Wirkung ausübt, welche, wenn auch ihrem Effekte nach gering, doch den Beweis liefert, daß man die Molekularbewegung der Dampfteilchen in deutliche sichtbare Bewegungen umwandeln kann, so ist dies im viel größeren Maßstab bei der Dampfmaschine der Fall. Bei diesem 1688 von Papin erfundenen Apparat, der bestimmt war, die Lebensweise der Kulturvölker von Grund aus umzugestalten, treibt der sich ausdehnende Dampf, der in einem besonderen Apparate, dem Kessel, sehr bedeutend erhitzt wurde, einen Kolben bald in der einen, bald in der entgegengesetzten Richtung vor sich her und setzt dadurch andere Maschinen in Bewegung. Die Kräfte, die auf diese Weise ausgeübt werden können, sind sehr bedeutend, sie rühren von der Wärme der unter dem Kessel verbrannten Brennstoffe her und es ist somit die Bestimmung der

Dampfmaschine, Wärme in Arbeit umzuwandeln. Näher ihre Einrichtung ins Auge zu fassen, müssen wir uns hier versagen, doch wird es von Interesse sein, auf einige Zweifel mit wenigen Worten einzugehen, die man neuerdings bezüglich der Zweckmäßigkeit ihrer Verwendung als Kraftmaschine ausgesprochen hat.

Berechnet man die Wärmemenge, welche die unter dem Kessel verbrannten Kohlen entwickeln, verwandelt dieselben dann in Kilogrammeter und vergleicht die so erhaltene Arbeit mit derjenigen, welche die Dampfmaschine erfahrungsgemäß liefert, so ergiebt sich das ungünstige Resultat, daß man bestenfalls 7% der entwickelten Arbeit nutzbar machen kann. Man hat diese verhältnismäßig geringe Arbeitsleistung namentlich dem Umstand zugeschrieben, daß das Wasser erst verdampft werden muß, ehe es in der Maschine wirken kann, und daß somit, da man den Dampf gewöhnlich in die Luft entweichen läßt, die latente Verdampfungswärme desselben meist verloren geht. Man suchte deshalb die 1816 zuerst ausgesprochene Idee mehr und mehr auszubilden, das Wasser durch Luft zu ersetzen, anstatt der Dampfmaschine die Heißluft- oder kalorische Maschine anzuwenden. Für die erste größere Maschine der Art konstruierte Erickson seinen Regenerator. Die Maschine selbst bewährte sich aber nicht. Die Luft muß nämlich, wenn sie eine Spannkraft ausüben soll, die der des Wasserdampfes gleichkommt, auf eine viel höhere Temperatur gebracht werden als dieser; bei derselben ist es aber noch nicht gelungen, die Kolben luftdicht schließend zu machen. Von der Herstellung von Heißluftmaschinen für größeren Betrieb ist man deshalb neuerdings ganz zurückgekommen, und daß dies mit vollem Recht geschehen ist, daß die Leistungsfähigkeit der Dampfmaschine ganz falsch beurteilt war, diesen Nachweis hat neuerdings Zeuner*) geliefert.

Man war nämlich gewöhnt, ihren Nutzeffekt mit dem der Wasserräder zu vergleichen, welche bis 80% von der Kraft be-

*) Gustav Anton Z., geb. 1828 zu Chemnitz, war Prof. in Zürich, ist jetzt Prof. in Dresden.

nutzen lassen, welche das auf sie fallende gestaute Wasser ausüben kann, wenn es von seinem oberen bis zu seinem unteren Spiegel herabsinkt. Dies ist nun aber nicht die Gesamtarbeit, die dieses Wasser verrichten kann. Wollte man diese in Rechnung ziehen, so müßte man das Wasser nicht nur um den geringen Unterschied jener beiden Spiegel sinkend denken, sondern um den Unterschied seines oberen Spiegels bis zur Oberfläche des Meeres. Daß aber nie daran zu denken ist, diese ganze Kraft jemals zu gewinnen, davon ist wohl jedermann von vornherein überzeugt. So billig beurteilt man aber die Dampfmaschine nicht; die von ihr verrichtete Arbeit drückte man immer in Prozenten derjenigen aus, welche die Brennstoffe überhaupt leisten könnten. Man wird nun aber doch nie eine Dampfmaschine bauen können, bei der nicht Wärme nötig ist, den Kessel und die ihn tragenden Mauern genügend stark zu erhitzen und sie auf ihrer Temperatur zu erhalten. Berechnet man aber den Nutzeffekt der Dampfmaschine, indem man diese unvermeidlichen Verluste berücksichtigt, also nur die dem Wasser im Kessel zugeführte Wärme als überhaupt benutzbare ansieht, so erhält man genau denselben Prozentsatz, wie bei den Wasserrädern auch, ja für die Berechnung ergeben sich in beiden Fällen sogar die nämlichen Formeln. Die Dampfmaschine hat also alle Aussicht, die weitaus wichtigste Kraftmaschine im Haushalte der menschlichen Gesellschaft, die sie jetzt ist, auch für die Zukunft zu bleiben.

Aber nicht nur im Haushalte der menschlichen Gesellschaft, auch im Haushalte der Natur spielt die Spannkraft der Wasserdämpfe eine große Rolle. Freilich tritt sie hier nur in Wirkungen auf, die uns jetzt meistenteils als unheilvolle, zerstörende erscheinen, die aber die letzten Zuckungen des großen Abkühlungsprozesses der Erde darstellen, deren Resultat die Bildung der festen Erdrinde selbst war. Durch die Risse und Spalten derselben sickert Wasser hindurch und gelangt so in die Nähe von Stellen, deren Temperatur noch eine sehr hohe ist, in die Nähe von vulkanischen Herden. Von hier wieder emporgetrieben, kann

es als heiße Quelle hervortreten, es kann aber auch in Dampf verwandelt und dieser so stark erhitzt werden, daß er Steine und Lavamassen mit enormer Gewalt vor sich hertreibend einen Ausweg in die Atmosphäre sucht. Daß die treibende Kraft bei den vulkanischen Ausbrüchen in der That erhitzte Wasserdämpfe sind, beweist die sehr große Menge derselben, die dabei dem feuerspeienden Berge entströmt.

In eigentümlichster Weise treten die Wirkungen durch vulkanische Wärme gebildeter Dämpfe wohl in Island in den Geisirs auf. Der bekannteste derselben ist der große Geisir, ein intermittierender Springbrunnen, welcher in Zwischenräumen von etwa 6 Stunden heiße Gewässer mit Dampf untermischt 40 m bis 60 m hoch emporschleudert. Nach den genauen Beobachtungen Bunsens ist der Geisir nichts anderes, als eine heiße Quelle, wie in seiner Umgebung auch noch andere vorhanden sind, welche ihre Gewässer durch ein cylindrisches 3 m im Durchmesser haltendes, $19^1/_2$ m tief in die Erde gehendes Rohr mit geneigtem Boden emporwirft. Dieses Rohr hat die Quelle selbst gebaut, indem sie aus den vulkanischen Gesteinen, aus denen sie hervorbricht, Alkalien und Kiesel löste und den letzteren beim Verdunsten an der Luft als Kieselsinter ausschied. Da diese Ausscheidung hauptsächlich an den Rändern erfolgte, wo die Schicht wegen ihrer geringen Dicke der Verdunstung am stärksten ausgesetzt war, so bildete sich im Laufe der Zeiten ein flaches Becken, aus welchem die Quelle in seitlichem Ausfluß sich ergießt. Dabei ändert sich der Ort des Ausflusses fortwährend durch verstärkten Sinterabsatz und so erhält dieses Becken nach und nach eine meist elliptische Form. In der Mitte, wo das Wasser emporquillt, tritt allein kein Niederschlag ein, so daß also die Quelle endlich einen Hügel bildet, dessen Gipfel ein Becken trägt, welchem sie entströmt. Der Hügel, aus welchem der große Geisir entspringt, hat jetzt eine Höhe von ungefähr 12 m, doch nimmt dieselbe, wenn auch langsam noch zu. Genaue Temperaturbeobachtungen im Innern des Geisirrohres haben nun Bunsen zu der folgenden Erklärung der Periodicität und Mächtigkeit der Ausbrüche

des Wassers aus denselben geführt. Die bei der Eruption zu so bedeutenden Höhen emporgeschleuderten Wassermengen kühlen sich in der Luft sehr beträchtlich ab und fallen so in das Becken und Rohr zurück. Die nächste Folge davon ist ein Herabsinken des Wasserspiegels aus dem Becken bis zu einer Tiefe von 1 bis 2 m unter seinen Stand vor der Eruption. Diese Abkühlung erstreckt sich bis zu den Wassermassen, welche die Zuführungskanäle des Hauptrohres ausfüllen. Die hohe Temperatur der Umgebung der Zuführungskanäle läßt nun aber das in ihnen enthaltene Wasser seine Temperatur langsam erhöhen, bis dieselbe den Siedepunkt, der dem hier obwaltenden Drucke entspricht, erreicht hat. Die Oberfläche des Wassers im Hauptrohre wird dadurch langsam gehoben, erreicht einige Zeit vor dem Ausbruch den Rand des Beckens und fließt über denselben in einer kleinen Kaskade ab. Gerät aber das Wasser in den unterirdischen Kanälen ins Kochen, so dringen die dadurch gebildeten Dämpfe in das weite Geisirrohr ein. Hier aber geraten sie in kühlere Schichten, in denen sie sich so plötzlich verdichten, daß eine heftige Detonation entsteht. Dabei erhöht sich die Temperatur des Wassers im Geisirrohr, und da das Sieden immer fortdauert, die Verdichtung der Dämpfe aber in immer höher gelegenen Regionen stattfindet, so nehmen diese Detonationen an Häufigkeit und Stärke zu. Im Becken bewirken die in seiner Mitte aufsteigenden Ströme heißen Wassers durch ihre Abkühlung an der Luft ein Absteigen des oberen kühleren Wassers, das in der Tiefe nun auch erhitzt wird, und kurz vor dem Anfang des Ausbruchs sind die Temperaturen in der ganzen Länge des Rohres nur noch wenig unter den Siedepunkten des Wassers, welche den in den verschiedenen Höhen stattfindenden Drucken entsprechen. Nun ergab sich aber die merkwürdige Thatsache, daß während kurz vor dem Ausbruch am unteren und oberen Ende des Rohres die Temperatur noch etwa 10° unter der des zugehörigen Siedepunktes war, dieselbe in der Mitte des Rohres nur noch 2° hinter jener zurückblieb, wohl infolge einer hier vorhandenen, in der

Bodenbeschaffenheit beruhenden stärkeren Erhitzung dieser Stelle. Würde das hier befindliche Wasser also nur etwa 2 m gehoben, so würde es in eine Region gelangen, in welcher seine Temperatur 1° über dem entsprechenden Siedepunkt läge. Dadurch muß aber dasselbe plötzlich in ein explosives Sieden geraten und so die nämliche Wirkung auf die höher liegenden Schichten hervorrufen. Der aufsteigende Dampf wird aber dann einen geringeren Druck auf die unterhalb dieser Schicht liegende Wassermasse ausüben, und infolge davon muß der Siedepunkt derselben zuletzt soweit erniedrigt werden, daß auch die Temperatur der unteren Wasserschichten höher wird als der entsprechende Siedepunkt. Somit gerät im Verlaufe aller dieser Erscheinungen die gesamte Wassermasse in explosives Sieden und die dabei entwickelte Kraft ist mehr als ausreichend, um die beobachteten Geisirwirkungen hervorzubringen. Berechnet doch Bunsen, daß die ganze Geisirsäule vom Boden bis zu dem Punkt, wo ihre Temperatur 100° beträgt, in Dampf verwandelt eine Dampfsäule von 1041 m Höhe gäbe. Diese ungeheure Kraft kann sich nicht in einem einzigen Eruptionsstrahl erschöpfen, auch nicht allein auf die Eruption verwendet werden, denn die in der Luft abgekühlten Wassermassen stürzen in das Becken zurück und kondensieren einen Teil des gebildeten Dampfes, so daß in den Pausen der Eruption das Wasser aus dem Becken oft geradezu in die Röhre eingesogen wird. Infolge davon erhitzen sie sich aber sehr bald wieder so stark, daß sie von neuem verdampft werden und nun die Eruption ihren Fortgang nehmen kann.

Hätte die gebildete Röhre nicht die große Weite, wie sie das Geisirrohr hat, so würde die Kondensation des Dampfes nicht stattfinden können, sondern das oben durch seine Verdichtung entstandene Wasser in fortdauerndem Strahl in die Höhe geschleudert werden, eine Erscheinung, die an vielen Orten in Island ebenfalls beobachtet wird. Wird endlich die Höhe der Röhre so beträchtlich, daß die Temperatur in ihrer Tiefe nicht mehr den dann auch höher werdenden Siedepunkt erreicht, so

wird ein gleichmäßiger Abfluß anstatt der Eruption eintreten, und auch derartige Erscheinungen zeigt die merkwürdige Insel. Solche auf alten Geisirröhren befindliche Quellen heißen Lauge. Der wie der Geisir intermittierende Dampf- und Wasserausbrüche zeigende Strokker hat ein sich nach unten stark verengendes Rohr und die in ihm enthaltene Wassermasse ihrer ganzen Ausdehnung nach die Siedetemperatur. Die Entleerung desselben geschieht aber nur durch die Eruptionen. Bunsen vermutet, daß in ihm ähnliche Ursachen für dieselben, nur in größeren Tiefen, wie beim Geisir vorhanden sind, und die dazu nötige Abkühlung noch durch den starken Verdampfungsprozeß in dem oberen Teil des Rohres verstärkt wird.

Die Sonnenwärme und ihre irdischen Wirkungen.

Er erübrigt nun noch den Ursachen der uns zur Verfügung stehenden Kräfte, der durch den Verbrennungsprozeß erhaltenen Wärme, der Kraft des Windes, des Wassers und der Muskeln der Menschen und Tiere nachzugehen. Alle lassen sich endgiltig auf Wärme zurückführen, welche von der Sonne auf die Erde gestrahlt ist. Alle chemischen Prozesse nämlich, durch deren Einleitung wir Wärme hervorrufen können, setzen die Verbrennung von Kohlenstoff oder Wasserstoff voraus, deren Ablagerung in den Pflanzen, wie wir sahen, nur unter Absorption von Licht vor sich geht. Die Kraft der ausgelöschten Lichtstrahlen wird also dazu verwendet, die Atome der Kohlensäure und des Wassers zu scheiden. Ihre Wiedervereinigung läßt sie zurückgewinnen. Auf die Pflanzen sind aber alle Tiere in ihrer Ernährung endgiltig angewiesen. Aus seiner Nahrung bildet der Tierkörper die Muskeln, die, indem ihre Fasern die Fähigkeit haben, sich zusammenzuziehen, imstande sind, die Bewegungen der Glieder zu bewirken. Bei jeder Kraftäußerung vermindert sich ihre Stoffmenge und muß während der Ruhe durch die Ernährungsstoffe, welche das Blut zuführt, wieder ersetzt werden. Die Muskeln wirken also gleichzeitig als Träger der Kraft und als Kraft-

maſchine, ſie repräſentieren den Dampf und die Dampfmaſchine zugleich.

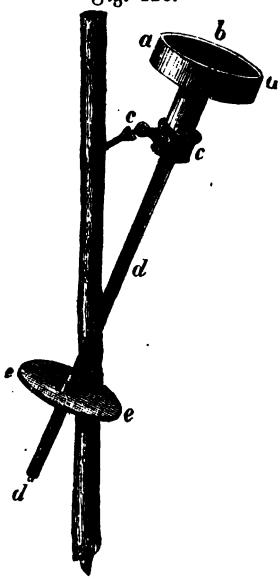
Ebenſo liefert uns die Sonnenwärme die Waſſerkräfte und die Kraft des Windes. Die erſteren ſtellt ſie uns zur Verfügung, indem ſie Waſſer verdampft, den Dampf ausdehnt und ſo emporſteigen läßt. Gelangt derſelbe dann in kältere, Regionen ſo wird er wieder verdichtet und fällt als Regen oder Schnee auf die Gebirge nieder; nach dem Meere hinfließend kann das von dieſen herabrinnende Waſſer vermöge ſeines Gewichts Arbeit verrichten. Der Wind aber, der es über die Gebirge hinjagt, entſteht, indem die Sonnenwärme, ſei es direkt, ſei es von dem Erdboden wieder ausgeſtrahlt, Luftmaſſen erhitzt und ſie dadurch zum Aufſteigen zwingt. In den ſo entſtehenden luftverdünnten Raum ſtrömt kältere Luft zu und beſitzt weil bewegt, die Fähigkeit, die Widerſtände ihr entgegenſtehender Körper, Windmühlenflügel, Segel ꝛc. zu überwinden.

Daß übrigens auch die Erdwärme in einzelnen Fällen Arbeit verrichtet, die wir freilich für uns nicht nutzbar machen können, hat uns ſoeben die Betrachtung der vulkaniſchen Ausbrüche und Geiſirs gezeigt. Nur in einem ganz vereinzelten Falle der Meermühlen in Korfu benutzt man die Bewegung von ſtrömendem Meerwaſſer als bewegende Kraft, deren Urſache in der Ebbe und Flut zu ſuchen iſt. Auf dieſe Art wird alſo auch die Anziehungskraft der Erde auf Mond und Sonne benutzt, um Arbeit zu verrichten.

Es liegt nun auf der Hand, daß die Menge der Wärme, welche die Sonne während einer gegebenen Zeit auf die Erdoberfläche ſendet, eine ſehr große ſein muß, da ſie ſo große Wirkungen in kurzer Zeit äußert. Weitaus größer noch muß die Wärmemenge ſein, welche die Sonne in derſelben Zeit in den Weltenraum ausſtrahlt. Aus den Beobachtungen der erſteren werden wir nun auf die letztere, die ſich unſerer direkten Beobachtung entzieht, leicht ſchließen können. Es iſt demnach für uns von großer Wichtigkeit, jene kennen zu lernen, und dazu

hat Pouillet das Pyrheliometer konstruiert. Dasselbe besteht aus einem flachen cylindrischen Gefäße a, Fig. 126, von Silberblech, dessen eine, der Sonne zugewendete Seite b berußt ist. Es wird mit Wasser gefüllt, und dann mittelst eines Korkes c^1 ein Thermometer d so befestigt, daß sein Gefäß sich im Wasser befindet, während sein Rohr an der von der Sonne abgewandten Seite herausragt. An diesem Rohr ist nun senkrecht zu seiner Achse die dünne kreisförmige Scheibe ee', deren Durchmesser genau gleich dem des Wassergefäßes ist, befestigt. Das Instrument aber kann um den Knopf c gedreht und so bewegt werden, daß der Schatten des cylindrischen Gefäßes stets genau die Scheibe ee' deckt. In diesem Falle treffen die Sonnenstrahlen senkrecht auf die berußte Fläche des silbernen Gefäßes. Aus der Temperaturerhöhung des Wassers in demselben läßt sich auf die zugeführte Wärmemenge schließen, wenn man die etwaige Erwärmung oder Abkühlung infolge von Temperaturerhöhung der umgebenden Luft berücksichtigt und eliminiert.

Fig. 126.



Die Beobachtungen mit diesem Instrumente haben ergeben, daß bei ganz heiterer Luft jeder Punkt der Erdoberfläche, welchen die Sonne zwölf Stunden lang bescheint, eine Wärmemenge erhält, welche hinreichen würde, um eine Eisschicht von 10 m Dicke zu schmelzen. Daraus ergiebt sich, daß die von der Sonne in einer Stunde ausgestrahlte Wärmemenge hinreichen würde, um 700 000 Mill. Kubikmeilen eiskalten Wassers zum Sieden zu bringen. Eine die Sonne in 3 m Dicke umgebende Schicht fester Kohle würde

diese Wärmemenge hervorrufen können, wenn sie in einer Stunde verbrannt würde. In einem Jahre müßte demnach eine die Sonne umgebende Kohlenschicht von $3^1/_2$ Meilen verbrennen, um die in dieser Zeit ausgestrahlte Wärme zu entwickeln. Würde man aber diese Wärme dem Sonnenkörper gleichmäßig entziehen, so würde seine Temperatur in derselben Zeit um $1^1/_3{}^0$ erniedrigt werden.

Bei der vollständigen Abhängigkeit alles organischen Lebens von der Kraft, welche den Sonnenstrahlen innewohnt, kann es einerseits durchaus nicht verwundern, daß in den meisten Religionen Sonnenkultus nachzuweisen ist, andererseits aber auch, daß man sich in neuerer Zeit die größte Mühe gegeben hat, die Ursache der Sonnenwärme ausfindig zu machen. An einen Verbrennungsprozeß von der erwähnten Intensität konnte man bei genauerer Betrachtung im Ernste nicht denken; wo sollte doch das Brennmaterial her-, wo die Verbrennungsprodukte hinkommen, die ein so mächtiger, Millionen von Jahren hindurch andauernder Prozeß der Art vorausgesetzt hätte? Mit der Annahme aber, daß der Wärme liefernden Verbindung stets eine Zersetzung folge, kam man durchaus nicht weiter, da um diese zu bewirken, ja dieselbe Wärmemenge, welche bei der Verbrennung frei wird, nötig gewesen wäre, für die Ausstrahlung also nichts übrig bliebe.

Das Prinzip der Erhaltung der Kraft fordert übrigens, daß die Wärme, welche die Sonne entwickelt, von Anfang an in Form von Wärme oder von Arbeitskraft in unserem Planetensystem vorhanden war. Wie man sich nun auch diesen Anfang denken will, „eine ungeheuer große Mitgift in dieser Beziehung", sagt Helmholtz, „war ihm schon allein in Form der allgemeinen Anziehungskraft aller seiner Teile zu einander gegeben", aus welcher Voraussetzung in Verbindung der sich mit derselben Notwendigkeit ergebenden Unveränderlichkeit des Stoffes, aus welchem die Weltkörper bestehen, Kant*) bereits im Jahre 1755

*) Immanuel K., geb. 1724 in Königsberg, wurde 1755 Privatdozent, 1770 Prof. daselbst und starb 1794 in seiner Vaterstadt.

die Möglichkeit der Bildung unseres Planetensystemes in einer Theorie auseinandergesetzt hat, welche 1796, wahrscheinlich ohne Kants Arbeiten zu kennen, La Place*) nochmals entwickelte. Darnach ist eine enorme Arbeitskraft bei dem jetzigen Zustand des Planetensystems vorhanden in der Bewegung der Planeten und der Sonne als Ganzem und in der schwingenden Bewegung ihrer einzelnen Teile, welche namentlich bei der hohen Temperatur der Sonne eine ganz ungemein heftige sein muß. Somit würde man daran denken können, daß der Wärmeverbrauch des Planetensystems entweder dadurch gedeckt würde, daß ihre Bewegung und die der Sonne oder daß die Bewegung ihrer einzelnen Moleküle nach und nach aufgehoben würde. Auf beide Art wären Wärmemengen zu erhalten, welche zur Erklärung der wirklich von uns beobachteten wohl ausreichen würden. Die Bewegung der Planeten könnte nun dadurch verringert oder verzögert werden, daß dieselben plötzlich stille ständen oder daß zwei zusammenstießen, da eine Verzögerung ihrer Bewegung durch den Widerstand des Äthers, wenn sie überhaupt vorhanden ist, nur äußerst gering sein kann. Würde die Erde plötzlich in ihrer Bahn stille gehalten, so würde dadurch ebenso viel Wärme entstehen, als 14 Erden aus reiner Kohle durch ihre Verbrennung erzeugen könnten, sie selbst würde, wenn sie aus Wasser bestünde, also die möglichst große Wärmemenge zur Erwärmung einer Kubikeinheit bedürfte, doch um 112 000° erwärmt werden, also in Dampf aufgehen. Eine plötzliche vollständige Hemmung der Bewegung der Sonne um ihre Achse, die in etwa 25 Tagen einmal erfolgt, würde den Wärmeverbrauch derselben, wenn dieser ungeändert bliebe, auf 116 Jahre decken. Fiele dagegen der Planet Merkur in die Sonne, so würde durch die dadurch bewirkte Erhitzung derselben ihr Wärmeverbrauch auf $6^{7}/_{12}$ Jahre be-

*) Pierre Simon Marquis de L. P., geb. 1749 in Beaumont in Auge (Dep. Calvados), war Lehrer an der Normalschule in Paris, 1799 kurze Zeit Minister des Innern, wurde später zum Grafen, Pair und Marquis ernannt und starb 1827 in Paris.

ſtritten; träfe die Erde das gleiche Geſchick, ſo würde die Ausſtrahlung der Sonne für $94^{5}/_{6}$ Jahre eine der jetzigen gleiche ſein können, und ereignete ſich ein Zuſammenſtoß der Sonne mit Jupiter, ſo würde dies für die Dauer von 32 240 Jahren der Fall ſein. Derartige Ereigniſſe ſind nun freilich, wenn überhaupt, dann erſt in ſo fernen Zeiten zu befürchten, daß uns bis jetzt noch alle Zahlenangaben dafür fehlen. Doch aber haben dieſe Rechnungen einen mehr als lediglich theoretiſchen Wert. Außer den Planeten iſt ja, wie wir wiſſen, das Planetenſyſtem noch faſt erfüllt von kleinen planetariſchen Körperchen, den Meteoren, welche zum Teil in regelloſen, zum Teil in Kometenbahnen die Sonne umkreiſen und oft genug auf ihnen begegnende Planeten fallen. In bei weitem größerer Menge werden ſie der viel ſtärkeren Anziehungskraft der Sonne unterliegen, und wenn wir auf die Menge der im Planetenſyſtem vorhandenen Meteore aus der Anzahl derer ſchließen, die uns im Durchſchnitt während einer Stunde dadurch ſichtbar werden, daß ſie der Erde nahe kommend durch Reibung an deren Atmoſphäre und Verzögerung ihrer Bewegung ins Glühen geraten, ſo ergiebt ſich, wie Mayer und Thomſon gezeigt haben, daß eine Wärmemenge bei der Vernichtung der Bewegung der Meteore durch ihren Sturz in die Sonne frei werden muß, welche mehr als ausreichen würde, den Wärmebedarf der Sonne für ihre Ausſtrahlung zu decken. Dann müßte man freilich annehmen, daß ein anhaltender und dichter Regen von Meteorſteinen fortwährend in die Sonne fiele, und man hat in der That in der die Sonne umgebenden leuchtenden Hülle, welche bei totalen Sonnenfinſterniſſen als Corona ſichtbar wird, ſolche erblicken wollen, wobei man die Beobachtung, daß das Licht derſelben polariſiert, alſo reflektiert ſei, als Beweis heranzog. Indeſſen würde dieſe Polariſation auch dann ſtattfinden können, wenn die Corona aus gasförmigen Teilchen, aus der Sonnenatmoſphäre beſtände, und ſodann ſtößt dieſe Meteoritentheorie auf die Schwierigkeit, daß ſie immer mehr Zufuhr aus den entlegeneren Teilen des Planetenſyſtems annehmen, ja end-

lich die Sonnenwärme von Meteoriten, die von außen in das System einträten, abhängig machen müßte.

Die Sonnenwärme erklärt sich deshalb wohl zwangloser aus der zweiten der obigen Hypothesen, die zugleich nichts weiter ist, als eine Konsequenz der von Kant und La Place gemachten Annahmen, aus einer fortgesetzten Verdichtung und somit Abkühlung des Sonnenkörpers. Nach dieser Annahme ging dem jetzigen Zustand unseres Planetensystems eine solche vollständige Dissoziation der Atome voran, die gleichmäßig in einem Raume verbreitet waren, welcher noch bis über die Neptunsbahn hinausreichte. Nur durch ihre verschiedene Schwere unterscheiden sich die Atome und infolge derselben entstanden nach dem Mittelpunkt der Anziehung dieser kosmischen Nebelmasse gerichtete Bewegungen, die durch die Widerstände der Atome, die dabei verdrängt werden mußten, seitliche Antriebe erhielten. Dadurch konnte eine Drehung der ganzen Masse eintreten und sich untergeordnete Centren der Anziehung bilden, die um das Hauptcentrum, den Schwerpunkt des ganzen Systems, welcher in der Sonne liegt, geschlossene Bahnen beschreiben. Um diese Centren lagerten sich die Atome und bildeten die Sonne, die Planeten und deren Monde. Zerstreute Partikelchen blieben in den dazwischen liegenden Räumen Meteoriten bildend zurück. Die Planeten und Nebenplaneten aber stellten zunächst glühende Gasmassen dar, welche sich nach und nach ihre Wärme ausstrahlend zu flüssigen Körpern verdichteten und endlich zu festen erstarrten, deren Rinde das noch heiße Innere vor weiterer Abkühlung schützt. In diesem Zustande dürfte sich jetzt die Erde befinden, deren Gestalt und geologische Beschaffenheit einen früheren flüssigen und also heißeren Zustand voraussetzt. Jupiter scheint noch flüssig, die Sonne gasförmig zu sein. Ihre Temperatur muß eine sehr bedeutende Höhe erreichen, die Versuche, sie zu bestimmen, geben aber noch so sehr auseinandergehende Resultate, daß wir Zahlen dafür nicht anzuführen wagen. Doch muß die hohe Temperatur der Sonne Ursache einer Strömung der heißeren inneren Sonnen-

teilchen nach außen werden, welche Strömung, obgleich sie sich gewöhnlich nur durch die granulierte Beschaffenheit der Sonnenoberfläche verrät, periodisch zu gewaltigen stürmischen Eruptionen Veranlassung geben kann. Durch diese werden ungeheuere Gasmassen, welche namentlich aus Wasserstoff bestehen, emporgeschleudert indem sie die Chromosphäre durchbrechen. Treten dieselben am Sonnenrande auf, so erscheinen sie als Protuberanzen, während ihre abgekühlten Massen, dunkle Flecken vor der hellen Sonnenscheibe bildend, Veranlassung zu den Sonnenflecken geben.

Die durch solche Abkühlungen bewirkten Wärmeverluste der Sonne werden eine Zusammenziehung ihres Volumens, also eine Verringerung ihres Durchmessers zur Folge haben und man hat die Wärmeausgabe, welche einer bestimmten Verkürzung entspricht, zu berechnen versucht. Diesen Rechnungen lag die Annahme zugrunde, daß die von der Sonne ausgestrahlte Wärmemenge stets ungeändert geblieben sei. Die Richtigkeit dieser Annahme ist aber zweifelhaft geworden, seit Ritter aus den Sätzen der mechanischen Wärmetheorie wahrscheinlich gemacht hat, daß wohl nur $^1/_5$ der durch die Schrumpfung der Sonne frei werdenden Wärme ausgestrahlt wird, daß dagegen $^4/_5$ derselben dazu verwendet werden muß, um ihre Temperatur zu erhöhen. Trotz der Wärmeverluste der Sonne ist also die Möglichkeit gegeben, daß ihre Temperatur und Lichtstärke wachsen. Doch muß dies Wachsen seine Grenzen haben, Abnahme der Temperatur und Lichtstärke werden folgen und es ist einstweilen noch nicht auszumachen, ob die Sonnentemperatur gegenwärtig in Zu- oder Abnahme begriffen ist. Das aber ist höchst wahrscheinlich, daß die Sonne noch $^4/_5$ derjenigen Wärme besitzt, die sie hatte, als sie sich noch über die Neptunsbahn hinaus erstreckte.

Sollte es sich nun auch herausstellen, daß die Temperatur der Sonne gegenwärtig im Wachsen begriffen wäre, so würde dieser Periode der Erwärmung doch eine Periode der Abkühlung folgen müssen, deren Ende ein Ausgleich aller Wärmeunterschiede wäre. Sobald ein solcher aber eintreten würde, so würde damit

nach dem Carnot'schen Satze auch die Möglichkeit der Umwandlung von Wärme in Arbeit aufhören, ohne welche wiederum individuelles Leben nicht mehr bestehen könnte. Wenn man sich nun auch alle Mühe gegeben hat, diesem freilich uns wenig befriedigenden Schlusse zu entgehen, so ist dies bisher nicht gelungen, und somit scheint die Geschichte des Weltalls den entgegengesetzten Gang zu nehmen, wie die der Menschheit, denn diese arbeitet unablässig auf die Ausbildung der Individualität hin, jene endet mit der Zerstörung derselben.

Register.

Aberration, chromatische 123.
— der Fixsterne 89.
— sphärische 46.
Absorption der Wärme 214, 222.
Absorptionsfarben 137.
Accademia del Cimento, die Versuche derselben mit Thermometern 193.
Accommodation 57.
Achse der Kugelspiegel 32.
— der Linse 41.
Aderhaut 56.
Äquivalent der Arbeit 267.
— der Wärme 267.
Äsculin, seine Fluorescenz 182.
Äther 92.
Aggregatzustand, Änderung desselben 271.
Alaun, seine Diathermansie 215.
Altersichtige 65.
Ångström untersucht die Fraunhofer'schen Linien 159.
Antimon in der Thermosäule 209.
Arago giebt an, wie zwischen den Lichttheorieen zu entscheiden sei 101.
— seine Versuche über die Undulationstheorie des Lichtes 105.
Arbeit, äußere 271.
— der Kraft 266.
— innere 271.
Arbeitseinheit 267.
Aristoteles kritisiert die Theorie des Lichtes der Alten 91.
Astigmatismus 67.
Auflösen 272.
Auflösungswärme 272.
Augapfel 53, 55.
Auge 53.
Augenachse 57.
— =butter 54.
Augenkammer, hintere 56.
— vordere 56.
Augenlider 53.
— =muskeln 54.
— =spiegel 40.
— =wimpern 54.
August, sein Gefrierthermometer 273.
Ausdehnung, kubische 200.
— durch die Wärme 188, 198.
— lineare 200.
Ausdehnungskoëfficienten, kubische 200.
— lineare 200.
Ausstrahlungsvermögen 221.
Baryumspektrum 148.
Becquerel, seine Versuche über Phosphorescenz 185.
Bessemers Stahlbereitungsmethode 157.
Bergkrystall, Diathermansie 215.
Beugungserscheinungen der Wärme 220.
— des Lichtes 176.
Bild, negatives 187.
— positives 187.
— reelles 17.
— virtuelles 17.
Blattgrün 138, 181.
Blaublindheit 134.
Blendlaterne 40.
Boyle, sein Gesetz 280.
Bradley, beob. die Aberration der Fixsterne 88.
Bravais, Theorie des weißen Regenbogens 129.
Brechung 11, 25.
— der Wärme 219.
— in Kugelflächen 40.
Brechungsgesetz 14.
— =verhältnis 15.
— =winkel 14.
Brennlinie 39.
Brennpunkt 33
Brennraum 45.
Brewster, sein Stereoskop 70.
— entdeckt die Linienspektren 146.
— sucht die Fraunhofer'schen Linien zu erklären 159.
Brockengespenst 8.
Büschel, Haidingersche 113.
Buffon schlägt Zonenlinsen vor 50.
Bunsen, sein Photometer 97.
— erfindet die Spektralanalyse 147.
— seine Geisirtheorie 294.

Calciumspektrum 148.
Caloric 197.
Camera obscura 47.
Carnot, sein Gesetz 268.
Cauchy, seine Begründung der Undulationstheorie 106.
Celsius, seine Thermometerskala 196.
Chamisso, Peter Schlemihl 6.
Charles, sein Gesetz 263.
Chemische Wirkung des Lichtes 186.
Chinin, seine Fluorescenz 182.
Chlorophyll 138, 181.
Chorioidea 56.
Chromosphäre 162.
Ciliarfalten 56.
— =muskel 56.
— =ring 56.
Clausius, seine Erklärung der Farbe des Himmels 174.
— seine Theorie der Wärme 251.
Colding stellt das Princip der Erhaltung der Kraft auf 265.
Cornea 56.
Corona 163.
Crookes, sein Radiometer 261.
Curkuma, ihre Fluorescenz 181.

Daltonismus 134.
Dampf 260.
— überhitzter 282.
— =maschine 291.
Davy, seine Sicherheitslampe 233.
Descartes, seine Ansicht über die Ausbreitung des Lichtes 87.
Deville, St. Claire, Dissociation 253.
Diaphragmen der Fernrohre 75.
Diathermansie 213.
Digestor 278.
Dimension, dritte 68.
Dissociation 253.
Dollond, seine achromatische Linse 123.
Donders, seine Studien über den blinden Fleck 60.
— entdeckt den Astigmatismus 67.
— untersucht die Fluorescenz des Auges 184.
Doppelbrechung der Wärme 220.
— des Lichtes 104, 111.
Dove, sein Bild zur Erklärung der Brechung des Lichtes, sowie der Undulationstheorie 100.
Dove setzt unpolarisirtes Licht aus polarisirtem zusammen 109.
Drebbel seine Ansprüche auf die Erfindung des Thermometers 192.
Drüsen, Meibom'sche 54.
Durchwärmigkeit 213.
Einfallslot 13.
— =winkel 13.
Eis, seine Diathermansie 215.
— künstliches 226.
— =keller 231.
— =maschine 285.
Emanationstheorie des Lichtes 91.
Emmetropie 65.
Emissionstheorie des Lichtes 91.
Entzündungstemperatur 248.
Ericsson, sein Regenerator 233.
Euler spricht sich für die Undulationstheorie des Lichtes aus 105.
— über die Achromasie der Linsen 123.
Expansion 199, 252.
Experimentum crucis 117.
Fahrenheit, seine Thermometer 194.
Faraday versucht die Gase flüchtig zu machen 284.
Farbe 114, 137.
— des Himmels 174.
— des Wassers 138.
— der Gase und Dämpfe 142.
— dünner Blättchen 171.
— opaker Körper 139.
— =ränder im Auge 130.
— transparenter Körper 137.
Fata morgana 24.
Feldstecher 73.
Ferdinand v. Toskana, sein Thermometer 194.
Fernpunkt 65.
Fernrohr 71.
— astronomisches 74.
— Galilei'sches 73.
— Gregory'sches 77.
— holländisches 73.
— Kepler'sches 74.
— Newton'sches 75.
— von Schyrlaeus 75.
Feuchtigkeit, wässerige 56.
Feuerzeug, pneumatisches 245.
Fixsterne, ihre Spektren 163.
Fizeau untersucht die Beugung der Wärmestrahlen 220.

Fleck, blinder 60.
— gelber 57, 61.
— Mariotte'scher 60.
Fludd, seine Ansprüche auf Erfindung des Thermometers 192.
Fluorescenz der Wärme 221.
— des Auges 184.
— des Lichtes 181.
Flußspat, seine Fluorescenz 181.
Föhn 245.
Foucault, seine Platinspiegel 19.
— entscheidet über Undulations- und Emissionstheorie des Lichtes 102.
— untersucht die Beugung der Wärmestrahlen 220.
Franklin untersucht das Sieden unter niedrigen Drucken 277.
Fraunhofer, seine Linien 158.
Fraunhofer'sche Linien, ihre Entstehung 159.
Fresnel, seine Arbeiten für Leuchttürme 49.
— begründet die Undulationstheorie des Lichtes 105.
— seine Messung der Wellenlänge des Lichtes 170.

Galilei erfindet das Fernrohr 73.
— erfindet das Thermometer 192.
Gas 260.
Gase, ihre Diathermansie 217.
Gay-Lussac, sein Gesetz 263.
Gefrierthermometer 273.
Geisir 294.
Geistererscheinungen 20.
Gesichtseindruck, Dauer desselben 63.
— -winkel 63.
Glanz 140.
Glaskörper 56.
Glaslinsen 41.
Goethe, seine Farbenlehre 118.
Grau 141.
Gregory, sein Fernrohr 77.
Grimaldi entdeckt die Beugungserscheinungen 176.
Guerickes Anspruch auf Erfindung des Thermometer 192.
Güteverhältnis 270.

Haidinger, die von ihm entdeckten Büschel 113.
Halbschatten 8.
Halley schlägt Quecksilber als thermometrische Substanz vor 195.
Halo 180.
Hauptbrennpunkt der Linsen 43.
Hauptregenbogen 128.
Haut, weiße, des Auges 55.
Heißluftmaschine 292.
Heliostat 21.
Heliotrop 21.
Helmholtz erklärt die Accommodation 58.
— erklärt, warum die Himmels-Körper in der Nähe des Horizontes größer erscheinen 64.
— über Goethes Farbenlehre 119.
— untersucht die Fluorescenz des Auges 184.
— stellt das Princip der Erhaltung der Kraft auf 265.
Herschel, sein Fernrohr 77.
Höfe um Sonne und Mond 180.
Hohlspiegel 33.
Hooke spricht sich für die Undulationstheorie aus 104.
Hornhaut des Auges 56.
Huggins untersucht die Spektren der Metalle 154.
Huygens, seine Lichttheorie 91.
— entdeckt die Doppelbrechung 104.
Hypermetropie 65.
Hygrometer 286.

Jamin, seine Versuche über Diathermansie 215.
Janssen erfindet das Mikroskop 72.
Janssen sieht die Protuberanzen bei Sonnenschein 162.
Inflexionserscheinungen 176.
Interferenz der Wärme 220.
— des Lichtes 169.
— -erscheinungen 169.
— -farben 170.
— -streifen 171.
Joule findet das Princip der Erhaltung der Kraft 265.
Iris 56.
Irisirende Körper 174.
Irradiation 131.
Kältemischung 275.
Kaleidoskop 23.
Kaliumspektrum 148.
Kalkspat 110.

Kandiszucker, seine Diathermansie 215.
Kant, seine Weltbildungshypothese 300.
Kante, brechende 116.
Kehlkopfspiegel 22.
Kepler, sein Fernrohr 74.
Kernschatten 7.
Kilogrammeter 267.
Kimmung 24.
Kircher, seine Laterna magica 48.
Kirchhoff erfindet die Spectralanalyse 147.
— das nach ihm benannte Gesetz 151.
Klima, kontinentales 224.
— ozeanisches 224.
Klinkerfues, sein Hygrometer 288.
Knoblauch, seine Versuche über Wärmestrahlung 213.
— seine Versuche über diverse Reflexion der Wärme 219.
— beobachtet die Doppelbrechung der Wärme 220.
Knotenpunkt des Auges 57.
Körper, durchsichtige 4.
— leuchtende 3.
— monothermische 216.
— nicht leuchtende 3.
— opake 4.
— optisch dichtere 16.
— optisch dünnere 16.
— phosphorescirende 185.
— thermochroische 216.
— undurchsichtige 4.
— wärmefarbige 216.
Kohäsion 199, 252.
Kohlenstoffspektren 157.
Kometen, ihre Spektren 163.
Komplementärfarben 119, 135.
Kraft, Erhaltung der 264.
Kraftmaaß 266.
Krystalle, doppelt brechende 110.
Krystallinse des Auges 56.
Kugelspiegel 32.
Kurzsichtigkeit 65.
Lampe, Locatelli'sche 213.
Landwind 224.
Laplace, seine Weltbildungshypothese 301.
Laterna magica 47.
Lauge 297.
Leeuwenhoek, Arbeiten mit dem Mikroskop 81.
Leidenfrost, der nach ihm genannte Tropfen 290.
Leitungsvermögen, äußeres 229.
— inneres 230.
Leslie, der nach ihm benannte Würfel 214.
Leuchtfarbe 185.
Leuchttürme 49.
Licht 3.
— -äther 92.
— einfaches 117.
— Fortpflanzung desselben 6.
— seine Geschwindigkeit 87.
— homogenes 117.
— -intensität 96.
— polarisirtes 106.
— -stärke 96.
— -strahlen 6.
— theilweise polarisirtes 110.
— zusammengesetztes 117.
Linie, kaustische 39.
Linienspektrum 148.
Linse 41.
— achromatische 123.
Lippershey erfindet das Fernrohr 72.
Listing, seine Messungen am Auge 57.
Lithiumspektrum 148.
Lockyer beobachtet die Verschiebung der Fraunhofer'schen Linien 162.
— sieht die Protuberanzen bei Sonnenschein 162.
Lokomotivlaterne 40.
Luftspiegelung 24.
Luftthermometer 193, 202.
Magnus, Versuche über die Diathermansie des Steinsalzes 215.
— Versuche über die Diathermansie des Wasserdampfes 218.
Malus entdeckt die Polarisation 105.
Mariotte entdeckt den blinden Fleck im Auge 60.
Maschine, kalorische 292.
Masson, Versuche über Diathermansie 215.
Maximum der Spannkraft 280.
Maxwell bestimmt die Menge Atome in 1 Cmr. Gas 283.
Mayer entdeckt das Prinzip der Erhaltung der Kraft 265.
— erklärt die Sonnenwärme aus dem Meteorsteinfall 302.

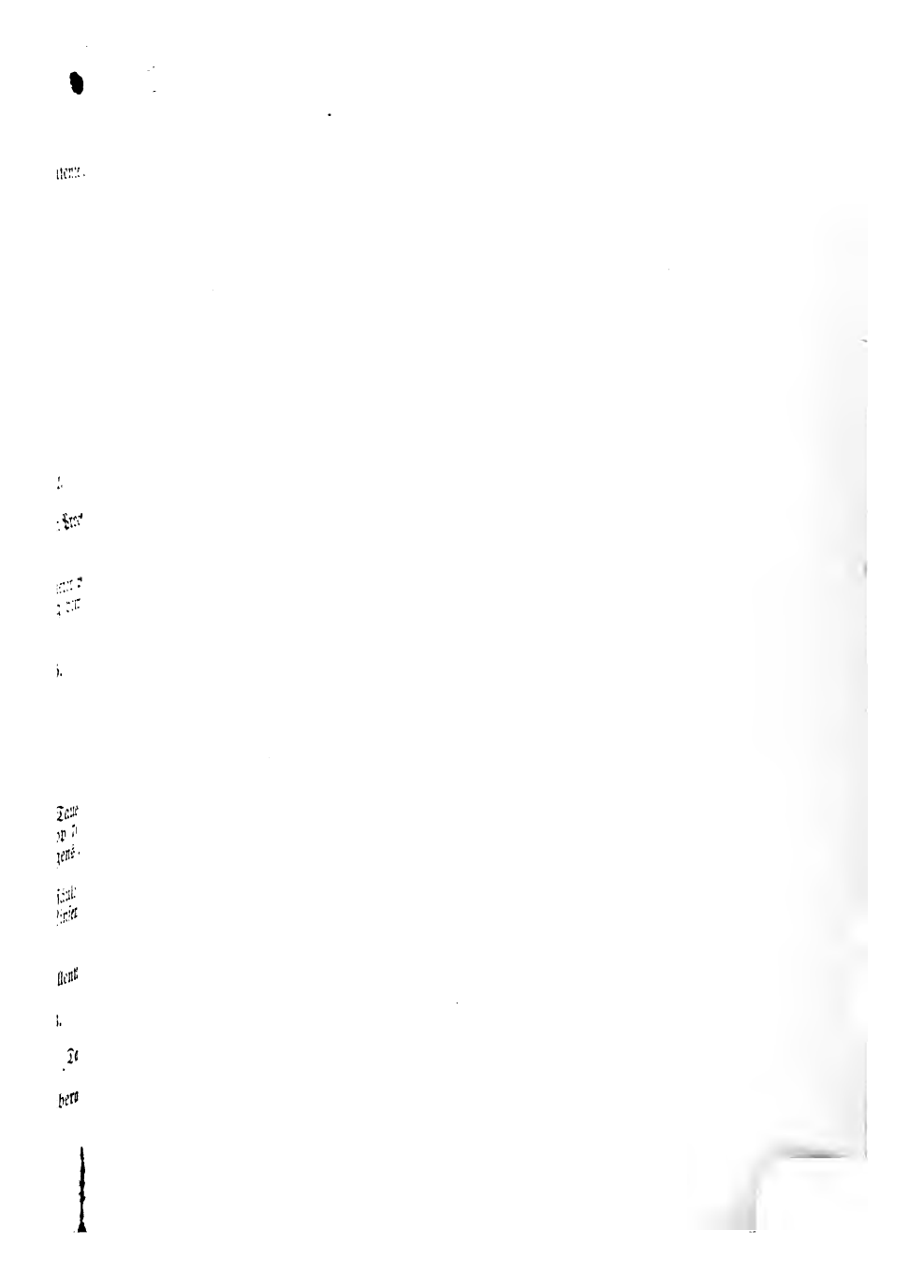
Medium 92.
Meermühlen 298.
Melloni, seine Thermosäule 212.
— Versuche über diffuse Reflexion der Wärme 219.
— seine Erklärung des Taus 225.
Metallthermometer 205.
Mikroskop 71, 80.
— einfaches 81.
— zusammengesetztes 81.
Mikroskopieren 82.
Mittel 92.
Mondregenbogen 129.
Mousson zeigt die Erniedrigung des Schmelzpunktes des Eises durch den Druck 275.
Myopen 65.
Nachbild, negatives 133.
— positives 132.
Nähepunkt 65.
Natriumflamme 150.
— -spektrum 148.
Nebelbilder 48.
Nebenregenbogen 128.
Netzhaut 57.
Netzhautstellen, identische 68.
Newton, sein Fernrohr 76.
— seine Lichttheorie 91.
— seine Farbenlehre 116.
Nickhaut 54.
Nicol, sein Prisma 111.
Nobili, seine Thermosäule 209.
Nordenskjöld, Farbe des Meeres 139.
Normalsichtige 65.
Nullpunkt, absoluter 262.
Nutzeffekt 270.
Objektiv 73.
Ohrenspiegel 40.
Okular 73.
Opernglas 73.
Papin beobachtet Abkühlung durch Ausdehnung komprimirter Luft 245.
— beobachtet die Aenderung des Siedepunktes mit dem Druck 277.
— sein Digestor (Topf) 278.
— erfindet die Dampfmaschine 291.
Perlmutterfarben 174.
Perpetuum mobile 270.
Petroleum, seine Fluorescenz 181.
Pettenkofer, seine Methode alte Bilder zu reinigen 175.
Phosphore 185.
Phosphorescenz der Wärme 221.
— des Lichtes 181, 185.
Photographie 186.
Photometer 96.
Photosphäre der Sonne 162.
Pigment, schwarzes im Auge 56.
Planeten, ihre Spektren 163.
Plinius erzählt von Geistern in d afrikanischen Gebirgen 8.
Plücker, Untersuchungen über d Spektren der Gase 156.
Polarisation der Wärme 220.
— des Lichtes 105.
Polarisationswinkel 110.
Polarisator 110.
Pouillet untersucht die Wärme-Au strahlung der Sonne 226.
— sein Pyrheliometer 299.
Porta, die von ihm erfundenen opt schen Apparate 47.
Presbyopen 65.
Prisma, achromatisches 123.
— Nicol'sches 111.
Protuberanzen 162, 304.
Psychrometer 287.
Pupille 56.
Pyrheliometer 299
Pyrometer 211.
Quecksilber als thermometrische Sub stanz 195.
Quecksilberthermometer 203.
Radiometer 261.
Ränder, farbige 120.
Rauchtopas, seine Diathermansie 21
Reaumur, seine Thermometerskala 19
Redtenbacher, seine Wärmetheorie 25
Reflektor (Fernrohr) 76.
— (Spiegel) 40.
Reflexion der Wärme 219.
— des Lichtes 11.
— diffuse 12.
— Erklärung nach der Emissions theorie 98.
— Erklärung nach der Undulations theorie 99.
— regelmäßige 14.
— totale 30.
— zerstreute 12.
Reflexionsgesetz 13.
— -winkel 13.

Refraktor 75.
Regenbogen 124.
— weißer 129.
Regenbogenhaut 56.
Regenerator 232.
Regengallen 128.
Reibung als Wärmequelle 246.
Reif 225.
Respirator 232.
Retina 56.
Rey, konstruirt das Flüssigkeits-thermometer 193.
Röhren, Geißler'sche 155.
Römer mißt die Geschwindigkeit des Lichtes 87.
Roscoe, Prüfung der Gase beim Bessemerprocess 157.
Rosse, sein Fernrohr 78.
Rostpendel 200.
Rothblindheit 134.
Rumford, Versuche über Wärmeleitung 230.
— sein Versuch über die bei der Reibung entwickelte Wärme 249.
Rutherford, sein Thermometrograph 207.
Sammellinse 41, 66.
Saussure, sein Hygrometer 228.
Schatten 4.
— farbige 135.
Scheitel des Spiegels 39.
Schielen 69.
Schiffslaterne 40.
Schlagschatten 6.
Schleuderthermometer 208.
Schmelzpunkt 275.
Schmelzwärme, latente 241, 249.
Schwarz 141.
Schyrlaeus, sein Fernrohr 75.
Sclerotica 55.
Seebeck beobachtet die Elektricitäts-erregung durch Wärme 209.
Sehachse 58.
Sehen 53.
— mit zwei Augen 67.
Sehnenhaut des Auges 55.
Sehnerv 53.
Sicherheitslampe 232.
Sicherheitsventil 278.
Siedepunkt 276.
— absoluter 284.
Siedeverzug 281.
Siemens, Friedr., sein Regenerator 234.
— Werner, seine dynamo-elektrische Maschine 269.
— Wilhelm, sein Pyrometer 211.
— sein Regenerator 234.
Singen 282.
Six, sein Thermometer 207.
Skalenrohr 145.
Snellius, das nach ihm benannte Gesetz 14.
Sonne, ihr Symbol 6.
Sonnenflecken 161, 162, 304.
Sonnenwärme erzeugt durch Contraktion 303.
— erzeugt durch Meteore 302.
Spaltrohr 144.
Spannkraft des Dampfes 280.
Spektralanalyse 147.
Spektroskop 143.
Spektrum 116.
— kannelirtes 157.
— 1. Ordnung 156.
— 2. Ordnung 156.
— reines 142.
Spiegel 17.
— erhabene 32.
— Fresnel'sche 169.
— hohle 32.
— konkave 32.
— konvexe 32.
— -bild 17.
— -teleskop 77.
Steinheil, sein Spektroskop 149.
Steinsalz, seine Diathermansie 215.
Stephenson, seine Sicherheitslampe 233.
Stereoskop 70.
Stevenson, seine Verbesserungen an Leuchttürmen 49.
Stookes, seine Versuche über Fluorescenz 182.
Strahl, einfallender 13.
— gebrochener 14.
— reflektierter 13.
— zurückgeworfener 13.
Strahlen, wirksame 126.
— -brechung, astronomische 28.
Strömer verbessert die Celsius'sche Thermometerskala 196.

Strocker 297.
Strontiumspektrum 148.
Substanz, thermometrische 193.
Sucher 77.
Swammerdam, seine Entdeckungen mit dem Mikroskop 81.
Tau 225.
Taupunkt 287.
Temperatur 189.
— absolute 262.
— kritische 284.
— =grade 195.
Thaumatrop 63.
Theodorich v. Freiburg, seine Theorie des Regenbogens 125.
Thermochrose 216.
Thermometer 192.
— belgisches 194.
— Drebbel'sches 194.
— florentinisches 194.
— maximirtes 208.
— registrierende 205.
Thermometrograph 207.
Thermosäule 209.
Thilorier stellt flüssige Kohlensäure her 284.
Thomson bestimmt die Erniedrigung des Schmelzpunktes mit dem Druck 275.
— erklärt die Sonnenwärme an dem Meteorsteinfall 302.
Thränendrüse 54.
— =flüssigkeit 54.
— =kanal 54.
— =punkt 54.
— =säckchen 54.
— =see 54.
Topf, Papin'scher 278.
Turmalin, seine doppeltbrechende Eigenschaft 111.
Tyndall, seine Untersuchungen über die Diathermansie des Wasser=dampfes 217.
Ueberschmelzung 273.
Uebersichtige 65.
Ultrarot 212.
Undulationstheorie 91.
Uranglas, seine Fluorescenz 182.
Vaporhäsion 218.
Verbrennungswärme 247.
Verdampfen 272, 279.
Verdampfungswärme, latente 24
Vergleichsprisma 146.
Wärme 188.
— specifische 240.
— strahlende 211.
— ihr Wesen 248.
— =kapacität 240.
— =einheit 197.
— =farbe 216.
— =leitung 227.
— =menge 197.
— =quellen, irdische 243.
— =sinn 188.
— =stoff 249.
— =strahlen 212.
— =theorie, mechanische 251.
— der Sonne 297.
— =wirkung des chemischen Proce 263.
— =zustand 189.
Walferdin, sein Thermometer 20
Wasser, Zusammenziehung beim wärmen 259.
Wasserstoffspektrum 148.
Weingeistthermometer 205.
Weiß 118, 136.
Weitsichtigkeit 65.
Wellenbewegung 92.
— longitudinale 93.
— transversale 93.
Wellenlänge 171.
Wells, seine Theorie des Taues
Wheatstone, sein Stereoskop 70.
Widerschein des Regenbogens 1
Winkelspiegel 23.
Wismuth in der Thermosäule
Wollaston entdeckt die Linsen Spektrum 158.
Würfel, Leslie'scher 214.
Young, verficht die Wellenthe des Lichtes 105.
— seine Farbentheorie 133.
Zerstreuungslinsen 41, 66.
Zeuner, Ehrenrettung der Dam maschine 292.
Zöllner beobachtet die Protuberan bei Sonnenschein 162.
Zonenlinse 50.

Druck von Greßner & Schramm in Leipzig.

LIBR OF TH



Gerland, E.
Lichte und Wärme
G4
NOV 8 1926
SEP 25 1936
SEP 25 1936
OCT 20 1939
OCT 6 1939
OCT 19 1939
Bindery
23 1940
QC 71
G 4
THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY